



HAL
open science

Assimilation de données de réflectance dans un modèle de fonctionnement de la betterave sucrière en vue de la prévision des rendements à l'échelle régionale

C. Duke

► **To cite this version:**

C. Duke. Assimilation de données de réflectance dans un modèle de fonctionnement de la betterave sucrière en vue de la prévision des rendements à l'échelle régionale. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut Technique de la Betterave; Institut National Agronomique Paris Grignon, 1997. Français. NNT : . tel-02835198

HAL Id: tel-02835198

<https://hal.inrae.fr/tel-02835198>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TH-EB13

Institut National Agronomique
Paris-Grignon

Institut Technique Français
de la Betterave Industrielle

Institut National
de la Recherche Agronomique

Unité d'Agronomie de Laon-Péronne

I.N.A-P.G.

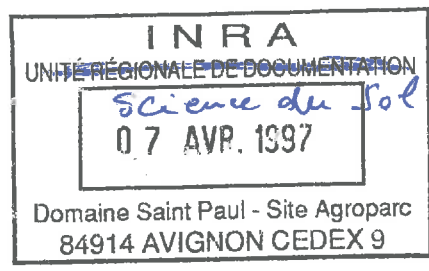
I.T.B.

I.N.R.A.

THESE

Présentée par

Christopher DUKE



pour l'obtention du titre de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

**Assimilation de données de réflectance dans un modèle
de fonctionnement de la betterave sucrière en vue de la
prévision des rendements à l'échelle régionale.**

Soutenue le 31 Janvier 1997 devant le jury composé de :

A. Perrier
J. Goudriaan
K. Laval
R. Bonhomme
M. Cariolle
M. Guérif

Professeur INA-PG
Professeur Wageningen Agricultural University
Professeur Université Paris VII
Directeur de Recherches I.N.R.A.
Ingénieur I.T.B.
Chargée de Recherches I.N.R.A.

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

A c k n o w l e d g e m e n t s

I am truly grateful for the assistance, support, and advice from many people during the course of this work.

Firstly, the co-financing of the thesis grant was given by the Institut Technique Français de la Betterave Industrielle (I.T.B.) and the Institut National de la Recherche Agronomique (I.N.R.A.). I am grateful to Mr. M. Choppin de Janvry and Mr. M. Richard Molard (Directeur Général and Directeur Adjoint, I.T.B. respectively) and to Mr. J. Boiffin (Chef du Département d'Agronomie de l'I.N.R.A.) for the support throughout this project.

I wish to acknowledge the members of the jury: Mr. A. Perrier (president, Professor, Institut National Agronomique Paris-Grignon), reporters Mr. J. Goudriaan (Professor, Wageningen Agricultural University) and Ms. K. Laval (Professor, Université Paris VII), and examiners Mr. R. Bonhomme (Directeur de Recherches, I.N.R.A.), Mr. M. Cariolle (Ingénieur, I.T.B.), and Ms. M. Guérif (Chargée de Recherches, I.N.R.A., and Directrice de thèse).

I am very thankful to Mr. Jérôme Guérif (Directeur de l'Unité d'Agronomie de Laon) for his considerable role in my coming to Laon and during the time throughout - right to the end. His support and "making things happen" are sincerely appreciated.

Additional support was given by several sources. Bas Bouman, W. Stol, (AB-DLO, Wageningen) and J. Goudriaan graciously provided versions of the SUCROS model, the FSEOPT program, and valuable advice. During the extensive data collection campaign of 1995, staff of the two co-operating sugar factories provided much assistance, notably Mr. J.M. Chassine (Générale Sucrière, Epeville) and Mr. J.F. Savalle (Compagnie Française de Sucrierie, Marle). The Programme National de Télédétection Spatiale provided financial support for data acquisition and processing. Staff of I.T.B. for the Somme and Aisne provided personnel support and le Syndicat Betteravier de l'Aisne and the Service Agronomique de l'Aisne provided beet analysis services.

Of course it is those who you work with directly who leave you with the greatest impressions, and here I must start with Martine Guérif who taught me and helped me immeasurably. This opportunity has been a valuable experience to me and I sincerely appreciate her scientific rigour and dedication.

I am grateful for the advice of my thesis committee members who provided me with valuable guidance: Frédéric Baret and Richard Delécolle of I.N.R.A., Avignon, and Albert Fischer of L.E.R.T.S., Toulouse.

During the course of this work, Carolyne Dürr and Guy Richard were very helpful, sharing with me their experience on our favourite beet. I am grateful to Jean Maucorps for his knowledge on regional soils and soil descriptions for this work. Thank you to Florence Brochery permitting my use of some of her data.

I was given much help during the field and lab work by the staff at Laon and at Mons-en-Chaussée during the intensive seasons of 1994 and 1995. Caroline Dominiarczyk, and Daniel Boitez,

Olivier Marloie, of Laon and Charles Leforestier, Paul Regnier, Bertrand Chauchard, and Jean François Levin of Mons. I really appreciate the help you gave and the pleasure we had. In particular, I'd like to thank Paul R. for all his extra help and skill regarding soil measurements, and Charles L. and Caroline D. with the many hours of plant measurements. Thank you too, Alain Masclet, for the help with the field surface measurements. André Marin-Lafèche helped me a lot with statistics questions and otherwise. Many thanks to the secretarial staff who helped me all the time, especially V. Dazin and B. Rocourt.

Many people were very kind to me and my family and made our life in this country very enjoyable. The Guérif family were very welcoming and helped us out in many ways. Bruno Mary and family were also very thoughtful. The Néel family were often very kind to us, particularly to Elise and Emma. You know that you all will be warmly received when you come to Canada. We shall be happy to see "la famille Anger" when we return home.

I wish to especially mention my fellow thésards, past and present, who have been great companions and help: Catherine Néel and Eric Mathey, Victor Jetten, Jean Noël Aubertot, Celso Aita, Adrian Andriulo, Alfredo Rodrigo, Jean François Sillon and Mélanie Plisson. I will really miss you. Thanks to Eric and Victor for computer help, Jean Noël for edits, and to Mélanie, Alfredo, Eric, and Catherine for their herculean efforts with the final production of this paper.

Lastly, but mostly, I want to thank my families and friends back home for all their support. Elise and Emma helped me more than they'll ever know.

Assimilation de données de réflectance dans un modèle de fonctionnement de la betterave sucrière en vue de la prévision des rendements à l'échelle régionale.

Résumé

Les modèles de fonctionnement de la betterave sucrière permettent de simuler la croissance d'une culture et de prévoir les rendements. Du fait de la tendance à l'avancement des dates de semis, les conditions de réalisation de la phase d'implantation à l'échelle d'une région peuvent être très variables et mal représentées par les paramètres standard du modèle, qui est alors mis en défaut et décrit mal la croissance et le rendement. Or, la télédétection satellitaire dans le domaine optique permet d'accéder à des caractéristiques des cultures (ex. état de développement foliaire) sur de grands domaines d'espace, et de façon répétée dans le temps. Grâce à un modèle de réflectance (SAIL) couplé avec le modèle de fonctionnement (SUCROS) par la variable indice foliaire (LAI), les mesures de télédétection acquises pendant la croissance précoce peuvent être assimilées dans le modèle de fonctionnement, permettant de re-étalonner le module décrivant l'implantation, et de simuler correctement les états de croissance et le rendement des cultures.

Ces deux modèles ont été évalués et étalonnés à l'échelle locale pour les conditions de culture du nord de la France, en conditions de croissance potentielle. La qualité du re-étalonnage dépend en particulier de la précision des paramètres de SAIL autres que le LAI: réflectance du sol, propriétés optiques et angles foliaires. La variabilité de ces paramètres dans une application à l'échelle régionale est un facteur important d'erreur. Nous avons analysé la sensibilité de la simulation la réflectance de la culture selon le niveau d'erreur produit par deux méthodes d'estimation de ces paramètres (avec ou sans mesure préalable de la variabilité).

On a ensuite simulé des situations réalistes d'assimilation de données de réflectance en grandeur nature en fixant une configuration d'acquisition de données satellitaires, et en faisant varier les conditions d'implantation des cultures. On a analysé les effets combinés de la variabilité des états de croissance et des erreurs sur les réflectances étudiées précédemment sur le processus d'assimilation des données de réflectance.

On montre qu'une connaissance préalable de la variabilité des caractéristiques du sol et des cultures et l'utilisation d'indices de végétation permettent de réduire fortement l'erreur sur l'estimation des réflectances, surtout en début de culture, où l'effet sol est important. Cette réduction de l'erreur améliore considérablement les résultats de l'assimilation des mesures de réflectance, à la fois en termes de re-étalonnage du module d'implantation et en terme d'estimation de l'évolution du LAI et du rendement final. On montre également que les résultats sont d'autant meilleurs que les acquisitions de données de réflectance pendant la phase d'installation du couvert coïncident avec des L.A.I. importants, limitant ainsi l'effet des erreurs sur la réflectance liées à l'effet du sol.

Mots-clés: Modèle de fonctionnement de culture, SUCROS, Betterave Sucrière, Implantation des cultures, Télédétection, Modèle de réflectance, SAIL, Etalonnage, Inversion de modèle, Méthode Monté Carlo, Analyse d'erreur.

Assimilation of reflectance data into a sugar beet crop growth model for yield forecasting at the regional scale.

Abstract

Sugar beet crop growth models may be used for crop growth simulation and yield forecasting. With the tendency to seed increasing early, field conditions during the period of crop establishment at the regional scale may be quite variable and poorly represented by standard parameter values of the crop model. It will then be in default and poorly describe growth and final yield. However, satellite remote sensing in optical wavelengths provide a means to sequentially access crop characteristics (ex. state of canopy development) over large surfaces. With the aid of a reflectance model (SAIL) coupled with the growth model (SUCROS) by the variable LAI, remotely sensed measurements acquired during early growth may be assimilated into the growth model, permitting a recalibration of the crop establishment module. The stages of growth and final yield of many crops may then be correctly simulated.

These two models have been evaluated and calibrated at the parcel level for optimal growing conditions in the north of France. The quality of recalibration depends in particular on the precision on the SAIL parameters other than LAI: soil reflectance, optical properties of leaves, and leaf angles. In applications at the regional scale, the variability of these parameters are an important factor in recalibration error. The sensitivity of canopy reflectance simulation was analysed depending on the error produced using two methods to estimate these parameters (with or without previous measurement of their variability).

Realistic situations of assimilation of reflectance data at a large scale were simulated fixing a given configuration of satellite data acquisitions, and by varying the conditions of crop establishment. The combined effects of the variability caused by the state of growth and the previously studied effects of errors on canopy reflectance on the assimilation process were analysed.

It is shown that beforehand knowledge of the variability of soil and crop characteristics and the use of vegetation indices permitted a significant reduction of error on the estimation of canopy reflectances, especially during early the growth period where the effect of soil reflectance is important. This reduction in error considerably improves the results of the assimilation of reflectance measurements, improvement both in terms of the recalibration of the crop establishment module, and in terms of the estimation of the evolution of LAI and final yield. Additionally, it is shown that the results are all the more satisfactory when the reflectance data acquisition during the phase of canopy establishment coincides with high LAI. This has the effect of reducing the recalibration errors introduced through soil reflectance variability effects.

Key words: Crop growth model, SUCROS, Sugar beet, Crop establishment, Remote Sensing, Reflectance model, SAIL, Calibration, Model inversion, Monté Carlo simulation, Error analysis.

Sommaire

Acknowledgements

Abstract / Résumé

1. Introduction.....	1
2. Revue bibliographique.....	5
2.1 La modélisation du fonctionnement physiologique d'une culture.....	5
2.1.1 Les définitions et les échelles.....	5
2.1.2 Les modèles existants adaptés à la betterave sucrière.....	6
2.1.2.1 Particularités biologiques de la betterave sucrière.....	6
2.1.2.2 Modèle simple (Monteith).....	7
2.1.2.3 Modèles plus complexes.....	8
2.1.3 La levée et la croissance juvénile de la betterave.....	9
2.1.3.1 Déterminisme et variabilité de la levée et de la croissance juvénile.....	10
2.1.3.2 Prise en compte de cette phase dans les modèles.....	12
2.1.3.3 Conclusions partielles.....	14
2.1.4 Conclusion: choix du modèle de fonctionnement de la culture.....	15
2.1.5 Description générale de SUCROS.....	15
2.2 La télédétection dans le domaine optique.....	16
2.2.1 Le principe de la réflectance.....	17
2.2.2 Les moyens de mesure.....	17
2.2.3 Déterminants de la réflectance.....	18
2.2.3.1 Facteurs externes.....	18
2.2.3.2 Facteurs liés à la végétation.....	19
2.2.3.3 Facteurs liés au sol.....	20
2.2.4 Indices de végétation.....	21
2.2.5 Les modèles de réflectance.....	23
2.2.6 Conclusions partielles: choix du modèle de transfert radiatif.....	25
2.2.6.1 Description de SAIL.....	26
2.3 Assimilation des données de télédétection dans les modèles de fonctionnement de culture.....	27
2.3.1 Principe.....	27
2.3.2 Méthodes.....	27
2.3.2.1 Correction par Forçage.....	28
2.3.2.2 Remise à jour.....	29
2.3.2.3 Correction par ré-initialisation ou ré-étalonnage.....	29
2.3.3 Méthodes d'inversion.....	31
3. Acquisition des données expérimentales.....	35
3.1 Les données d'étalonnage des modèles.....	35
3.1.1 Le dispositif expérimental.....	35
3.1.2 Données climatiques.....	36
3.1.3 Humidité du sol.....	37
3.1.4 Les mesures du couvert.....	38
3.1.4.1 Levée.....	38
3.1.4.2 Mesures de croissance.....	38
3.1.4.3 Suivi précis des croissances des feuilles.....	40
3.1.4.4 Bilan radiatif dans le PAR.....	41

3.1.4.5 Réflectance bidirectionnelle.....	42
3.1.4.6 Photosynthèse.....	48
3.2 Données acquises pour le test du modèle couplé	51
3.2.1 Création des conditions de la situation test.....	52
3.2.1.1 Choix des techniques d'implantation.....	52
3.2.1.2 Résultats.....	52
3.2.2 Les mesures.....	53
3.2.2.1 La levée.....	53
3.2.2.2 Les mesures de croissance.....	53
3.2.2.3 Les mesures de réflectance.....	54
3.3 Variabilité spatio-temporelle des paramètres de SAIL.....	55
3.3.1 Variabilité de la réflectance du sol	55
3.3.1.1 Les sites étudiés.....	55
3.3.1.2 Les facteurs de variabilité.....	56
3.3.1.3 Les types de sol.....	56
3.3.1.4 Les droites de sols.....	57
3.3.1.5 Les relations réflectance-humidité.....	58
3.3.2 Variabilité des caractéristiques de la culture.....	59
3.3.2.1 Propriétés optiques.....	59
3.3.2.2 Angles foliaires	60
4. Mise au point du modèle couplé SUCROS+SAIL	61
4.1 SUCROS.....	61
4.1.1 Description détaillée de SUCROS	61
4.1.1.1 Schéma journalier de la croissance.....	62
4.1.1.2 La modélisation de l'absorption de rayonnement et de la photosynthèse brute.....	63
4.1.1.3 Paramètres de SUCROS.....	65
4.1.2 Analyse de sensibilité de SUCROS	66
4.1.2.1 Paramètres de la levée.....	67
4.1.2.2 Paramètres de la croissance autotrophe.....	69
4.1.3 Étalonage de SUCROS.....	71
4.1.3.1 Détermination des paramètres de la levée.....	72
4.1.3.2 Etalonnage des modules de la croissance autotrophe.....	72
4.1.3.3 Résultats de l'étalonnage de SUCROS.....	78
4.2 Le modèle SAIL.....	79
4.2.1 Description du fonctionnement et des paramètres de SAIL.....	79
4.2.2 Analyse de sensibilité de SAIL.....	81
4.2.2.1 Sensibilité aux paramètres du couvert.....	81
4.2.2.2 Sensibilité à la réflectance du sol	82
4.2.2.3 Sensibilité à la géométrie d'illumination et de visée	83
4.2.3 Résultats de l'étalonnage de SAIL	83
4.3 SUCROS et SAIL couplés	84
4.3.1 Simulation des réflectances de la cultures.....	84
4.4 Conclusions partielles	85

5. Analyse des erreurs sur les estimations de réflectance liées au mode d'estimation des paramètres du modèle SAIL	86
5.1 Introduction.....	86
5.2 Méthodes	88
5.2.1 Etude de la variabilité des paramètres de SAIL à l'échelle régionale	88
5.2.2 La réflectance du sol.....	88
5.2.2.1 Les paramètres de la végétation	89
5.2.3 Estimation des erreurs sur les estimations de réflectance du couvert.....	89
5.2.3.1 Création de réflectances de synthèse par la technique de simulation Monte-Carlo ..	90
5.2.3.2 Méthode de mesure de l'erreur	91
5.2.3.3 Indices de végétation.....	92
5.3 Résultats	93
5.3.1 Les réflectances simulées.....	93
5.3.1.1 Les réflectances "standard".....	93
5.3.1.2 Les réflectances synthétiques "vraies".....	94
5.3.2 Mesure des erreurs sur les réflectances.....	94
5.3.2.1 Cas du LM	94
5.3.2.2 Cas des sols LA et C.....	97
5.3.3 Mesure des erreurs sur les indices de végétation	98
6. Assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé SUCROS + SAIL	101
6.1 Estimation des paramètres de la phase d'implantation.....	102
6.1.1 Position du problème et méthodologie.....	102
6.1.1.1 Formalisation du problème, nombre de paramètres à estimer.....	102
6.1.1.2 L'estimation des paramètres	103
6.1.1.2.1 La méthode	104
6.1.1.2.2 Sensibilité de l'estimation des paramètres aux erreurs de mesures.....	105
6.1.2 Résultats	106
6.1.2.1 La solution vraie: cas d'un paramètre (situation expérimentale)	106
6.1.2.2 Cas de deux paramètres	106
6.1.2.3 Cas de trois paramètres	108
6.1.2.4 Conclusion.....	109
6.2 Assimilation de données de réflectances par le modèle couplé: étude sur un cas-test en situation expérimental	110
6.2.1 Méthode	110
6.2.2 Résultats	110
6.3 Assimilation de données de réflectances par le modèle couplé: étude à l'échelle régionale à partir de situations simulées	111
6.3.1 Méthodologie.....	112
6.3.1.1 Création de situations réelles	112
6.3.1.2 Assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé	113
6.3.1.2.1 Position du problème	113
6.3.1.2.2 Méthode	114
6.3.1.2.3 Analyse des résultats.....	114
6.3.2 Résultats	115
6.3.2.1 Étude d'une situation culturale: effet des erreurs sur les réflectances	115
6.3.2.1.1 Assimilation des réflectances.....	115
6.3.2.1.2 Assimilation des indices de végétation	118
6.3.2.2 Étude de l'ensemble des situation culturales: effet des dates de mesure et des erreurs sur les réflectances.....	120

Conclusion..... 125

Références bibliographiques..... 129

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction

1. Introduction

On dispose depuis plusieurs années de modèles qui représentent le fonctionnement de la culture et de ses relations avec le sol, l'atmosphère et, à des degrés variables, les interventions culturales. Ces modèles reproduisent les processus écophysologiques avec un pas de temps généralement journalier sur de longues périodes de temps (plusieurs mois), du semis à la récolte. La plupart des modèles ont été développés pour aider à la compréhension du développement et du fonctionnement des cultures, et ils sont des outils de recherche. Mais ils constituent également des outils très intéressants pour le diagnostic de situations culturales en temps réel ou l'estimation de la production en cours de culture. Ces objectifs s'appliquent généralement à des grands domaines d'espace, pour lesquels on peut généralement avoir une caractérisation pédoclimatique de l'espace, mais on ne dispose pas de la connaissance de l'ensemble des paramètres ou des conditions initiales (date de semis, contenu initial du sol en eau, en azote et matière organique...) nécessaires au fonctionnement du modèle.

La télédétection permet, par des mesures d'énergie réfléchie ou émise par les surfaces visées, d'accéder à des caractéristiques de ces surfaces, et ce, de façon répétitive et sur de grands domaines d'espace. Des mesures dans différents domaines de longueur d'onde donnent accès à différents types de caractéristiques biophysiques des surfaces. Dans le cas du domaine visible-proche infra rouge, qui constitue le domaine des satellites d'observation de la Terre comme SPOT, et quand les surfaces visées sont des couverts agricoles, on peut accéder à des informations sur l'état de développement du couvert. Cet accès nécessite la mise en oeuvre de modèles spécifiques décrivant la physique de l'interaction entre le rayonnement et le couvert végétal, et surtout, leur inversion (connaissant la mesure télédéteectée, on peut trouver la caractéristique de la surface).

Le fait que, grâce à l'outil télédétection, on puisse disposer de façon répétitive, sur un large domaine d'espace, et en chacun de ses points (c'est à dire en particulier pour chaque parcelle), d'information pertinente sur l'état de développement de la culture, qui est une variable d'état des modèles de fonctionnement de la culture, rend possible une mise en oeuvre conjointe et complémentaire de ces 2 outils, télédétection et modèle de culture. Il est en effet possible d'utiliser les informations obtenues par télédétection dans des procédures de contrôle des modèles de fonctionnement (on parle d'assimilation des données de télédétection dans les modèles de fonctionnement) (cf. Guérif, 1995): les mesures de télédétection permettent d'estimer les valeurs locales de certains paramètres du modèle (ou de certaines conditions initiales) du modèle de culture. Celui-ci devient alors un outil performant de diagnostic de l'état des cultures et d'estimation (ou prédiction) des rendements à l'échelle de régions.

Dans le cas de la betterave sucrière, la demande d'outils de diagnostic et de prévision -- applicables à l'échelle de régions de production plus ou moins grandes, existe. Elle est exprimée à la fois par le secteur du Développement (et l'Institut Technique de la Betterave en particulier), et par les fabricants de sucre d'autre part. Pour les premiers, il s'agit de disposer d'un outil, facilement paramétrable pour une région donnée, qui permet d'estimer les états de croissance et de développement des cultures, de manière à faire un diagnostic sur les causes de différences éventuelles entre situations, années....

Pour les groupes sucriers, la demande concerne un outil de prévision des rendements qui permet de gérer les décisions de mise sur le marché ou de stockage des produits fabriqués, comme pour n'importe quelle autre filière. Cet outil doit pouvoir offrir une précocité de la réponse et un coût meilleur que les méthodes traditionnelles procédant par prélèvements dans les champs échelonnés au cours de la campagne. Il doit permettre aussi une prévision à l'échelle des unités de production. La connaissance préalable des quantités de racines à traiter est en effet essentielle pour les approvisionnements en énergie, pierres à chaux (qui interviennent dans les procédés de purification des jus sucrés) et produits adjuvants qui sont nécessaires à la fabrication du sucre.

L'utilisation combinée d'un modèle de simulation du fonctionnement de la culture de betterave sucrière et de données de télédétection est une réponse possible à ces attentes, et c'est dans ce cadre que se situe le travail présenté ici.

La culture de la betterave sucrière en France, est une culture dont les rendements ont très fortement progressé depuis 30 ans (de 4.5 tonnes de sucre par hectare dans les années 60, à 10.7 tonnes pour l'année record 1993). Cette progression est due à la fois aux progrès de la génétique (création de variétés monogermes et d'hybrides triploïdes, augmentation du pouvoir germinatif, induction de résistances aux maladies, amélioration de la forme de la racine,...) et à une évolution de la conduite agronomique (très forte augmentation de la densité de peuplement, dates de semis plus précoces, gestion raisonnée de la fertilisation et de la protection des cultures, dates de récolte plus précoces, avec un matériel amélioré conduisant à une réduction de la tare-terre) (cf. Dürr, 1994).

L'évolution des pratiques culturales vers des semis de plus en plus précoces (la majorité des semis se fait avant le 15 Avril, et une proportion croissante se fait avant la fin Mars quand c'est possible) est permise par l'évolution du machinisme (outils combinés qui permettent de réduire la durée des chantiers, puissance des tracteurs et pneumatiques basse pression qui permettent d'entrer dans les parcelles en conditions plus humides). Elle répond à l'objectif de maximiser le rendement : en rendant plus précoce la mise en place du couvert foliaire, elle permet de maximiser l'interception de la lumière dont on sait que, en l'absence d'autres facteurs limitants, elle fixe le potentiel de production de sucre (cf. Scott and Jaggard, 1992). Cependant, l'avancée des dates de semis au printemps s'accompagne d'une augmentation des risques d'implantation en conditions défavorables (sols moins ressuyés, d'où une préparation des lits de semences plus difficile, températures basses rendant les levées plus lentes et induisant une plus grande sensibilité aux phénomènes de battance causés par les pluies, qui créent des obstacles pour les plantules), particulièrement dans les climats du nord de la France et les sols limoneux qui constituent une grande partie des zones betteravières de cette région.

Cette tendance à l'avancée des dates de semis s'accompagne donc globalement d'une augmentation de la variabilité des conditions d'implantation, qui se traduit par des caractéristiques de mise en place des couverts foliaires très variables (durée semis-levée, état de croissance à la levée, vitesse initiale

de croissance). Le déterminisme de ce que l'on appellera dans la suite la phase d'implantation et qui recouvre les phases de semis, levée et croissance précoce des plantules, est actuellement un objet d'études et de modélisation par l'équipe Implantation de l'INRA de Laon (cf. Boiffin *et al.*, 1994) mais pour l'instant les modèles de simulation des cultures sont dépourvus de ce type de modélisation et ne peuvent rendre compte de cette variabilité de situations qu'on ne manque pas de rencontrer à l'échelle du bassin d'alimentation d'une sucrerie, sous l'effet des différents itinéraires techniques et de leurs interactions avec les conditions de sol et de climat.

C'est dans cette situation agronomique particulière, où les paramètres du modèle responsables de son fonctionnement imparfait peuvent être clairement identifiés, qu'un programme sur l'utilisation conjointe d'un modèle de simulation de la betterave et de données de télédétection dans le domaine optique a été engagé: les données de télédétection acquises au niveau de chaque parcelle permettant d'accéder aux états de croissance réels des cultures sur tout le domaine d'espace, et de ré-estimer, pour chaque parcelle, les caractéristiques résultant de la phase d'implantation. Mon travail de thèse consiste en la mise au point et l'évaluation d'une telle méthodologie. Un des objectifs à moyen terme de ce programme est d'appliquer cette méthode en grandeur nature, à l'échelle de bassins d'alimentation de sucreries, et d'évaluer ses performances en termes de prévision de rendement.

Pour circonscrire le cadre de l'étude, on a fait les hypothèses, a priori raisonnables dans le nord de la France et pour cette culture, qu'en dehors de la phase d'implantation, les conditions de culture sont non limitantes (hormis bien sûr problèmes pathologiques que nous éliminerons). Ces hypothèses nous permettent 1) de travailler avec un modèle décrivant la croissance en conditions optimales et 2) de focaliser le réétalonnage du modèle sur cette première phase, en considérant que les paramètres impliqués dans les autres processus seront valides à l'échelle de la petite région. En réalité, les occurrences de stress hydrique pendant l'été nous ont conduit à différer la phase d'application en grandeur nature de façon à pouvoir nous doter d'un modèle capable de prendre en compte la contrainte hydrique.

Le travail que j'ai réalisé pendant ces trois années est présenté dans les chapitres qui suivent selon les différentes étapes:

- l'étape bibliographique qui m'a permis, outre une analyse des connaissances acquises sur la question et des méthodes utilisables, de faire un choix des outils utilisés dans la suite: un modèle de fonctionnement de la culture de betterave sucrière et un modèle de réflectance;
- l'étape expérimentale qui m'a permis d'acquérir les données nécessaires à l'évaluation et la mise au point des modèles utilisés, ainsi que la caractérisation d'un certain aspect de la variabilité régionale.

L'exploitation conjointe des modèles et des données est rapportée au cours des trois chapitres suivants:

- l'étape d'évaluation et d'étalonnage des deux modèles couplés sur les données acquises en station expérimentale;
- les deux étapes suivantes ont consisté en une analyse des erreurs liées à l'application de la méthodologie mise au point en grandeur nature, à l'échelle de bassins d'alimentation de sucreries: erreurs sur l'estimation des paramètres nécessaires au modèle de réflectance, et répercussions de ces erreurs sur le processus du modèle de culture.

Revue bibliographique

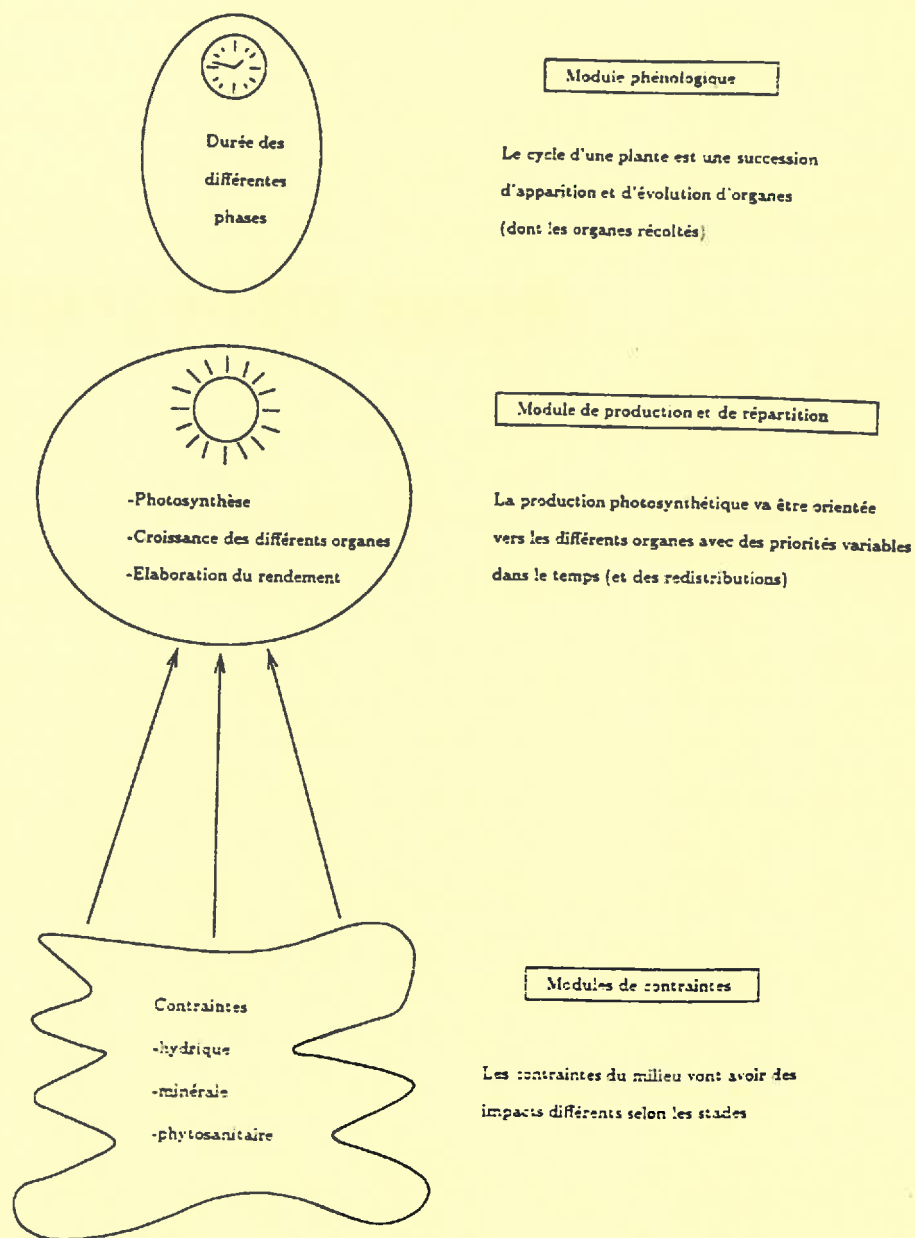


Figure 2-1. Schéma général des modèles de simulation des cultures (Bonhomme *et al.*, 1995).

2. Revue bibliographique

2.1 La modélisation du fonctionnement physiologique d'une culture

2.1.1 Les définitions et les échelles

Un modèle de fonctionnement d'une culture est l'organisation sous forme mathématique d'un ensemble de connaissances sur les processus biophysiques qui décrit, de façon simplifiée, le fonctionnement d'une culture dans un milieu donné (Bonhomme *et al.*, 1995). Il utilise les données d'entrée et les paramètres spécifiques des processus concernés et calcule de façon dynamique les valeurs des variables intermédiaires et des variables de sortie qui décrivent l'état de la culture. Les données d'entrées sont notamment les données climatiques et les conditions d'initialisation des différentes variables du modèle. Les paramètres (aussi appelés coefficients) caractérisent le fonctionnement des processus (valeurs limites, taux...) pour des espèces et des lieux donnés (de Wit, 1982). Les variables d'état intermédiaires décrivent les états instantanés des différents compartiments du modèle (ex. : rayonnement intercepté, assimilation nette, transpiration,...). Les variables de sortie sont les variables qui caractérisent les états de la culture (surfaces et masses des différents organes [le rendement n'étant généralement que la valeur finale de la masse d'un organe particulier] contenu en eau du sol...).

Les niveaux d'organisation que l'on peut considérer pour la modélisation du fonctionnement des végétaux sont évidemment très variables: de la molécule à l'écosystème, en passant par la cellule, l'organe, la plante, la culture (Bonhomme *et al.*, 1995). Les échelles de temps auxquelles les processus doivent être décrits sont bien sûr étroitement liées aux niveaux d'organisation précédents. En tout état de cause, le choix des échelles d'espace et de temps de modélisation dépend des sorties attendues, et doit prendre en compte la règle énoncée par de Wit (1982) que seuls trois niveaux d'organisation différents peuvent être pris en compte dans les modèles complexes. Dans le cas des modèles de culture et de leur utilisation pour l'estimation de la production, les trois échelles généralement prises en compte sont:

- pour les niveaux d'organisation: la feuille, la plante, le couvert. Le niveau plante, qui supposerait de gérer les interactions entre plantes est rarement présent dans les modèles de culture: la culture est souvent considérée comme un ensemble d'organes (feuilles, racines...),
- pour les échelles de temps: l'heure, la journée, le cycle de culture. (Compte tenu de la résolution des données météorologiques classiquement disponibles, on procède souvent dans les modèles de culture à des décompositions horaires des facteurs climatiques à partir des données journalières).

La Figure 2-1 montre un schéma général des modèles de fonctionnement des cultures. Le moteur principal de ces modèles est constitué par l'assimilation nette de carbone et la distribution des assimilats produits vers les différents organes qui permettent la croissance de ces organes. Les processus impliqués dans ce fonctionnement sont régis au cours du temps par un module phénologique. Celui-ci décrit l'apparition des phénomènes de développement de la culture qui

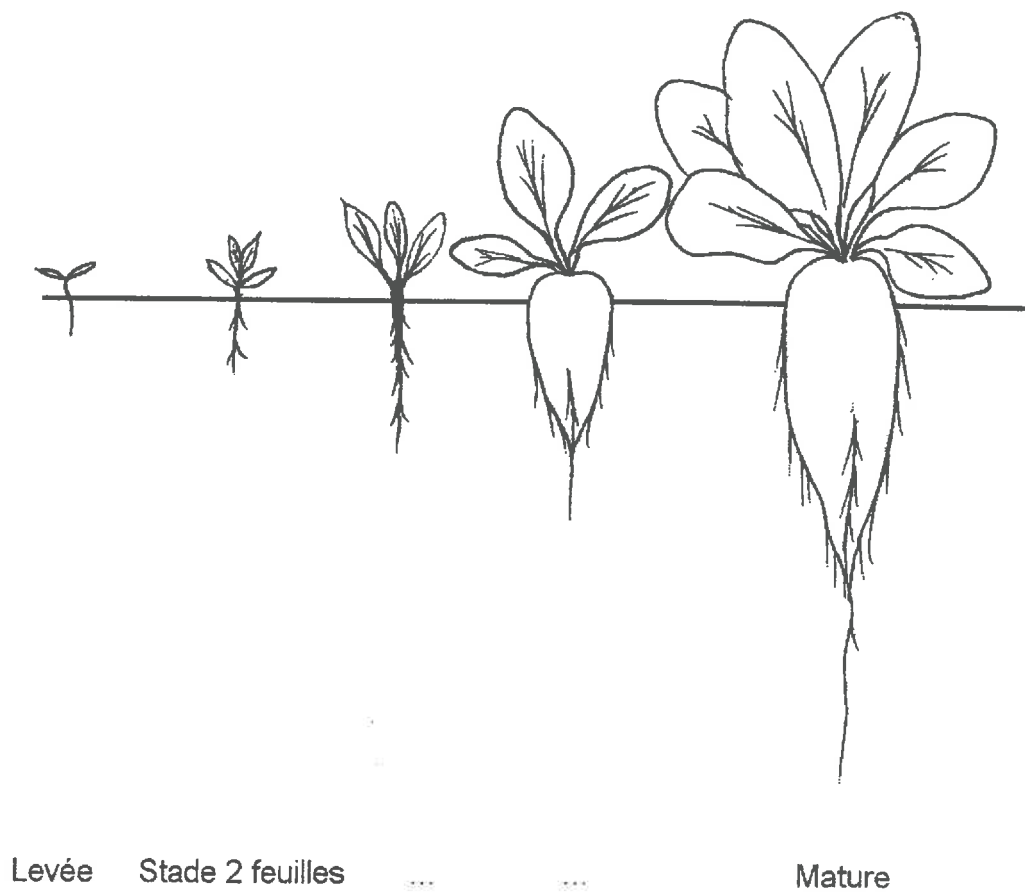


Figure 2-2. Evolution morphologique de la betterave (d'après Soltner, 1980).

rythment son évolution au cours de temps, en délimitant des phases pendant lesquelles les organes se mettent en place et où les lois qui régissent les processus peuvent varier (modification du schéma de répartition des assimilats avec la mise en place de nouveaux organes, évolution du taux de sénescence, des capacités photosynthétiques et des besoins de respiration avec l'âge de la culture...). Le développement est souvent régi par des sommes de température au dessus d'une température seuil. Les schémas les plus compliqués prennent en compte le photopériodisme et la vernalisation (Bonhomme, 1995).

Ce schéma général est toujours présent dans les modèles: il permet de décrire la croissance et le développement en conditions de culture optimales, sans limitation de la disponibilité en eau et en éléments minéraux, et sans problème d'ordre phytosanitaire. Ces conditions étant rarement rencontrées, des modules de contraintes relatives à ces limitations ont été inclus dans certains modèles. Dans le cas de l'eau ou de l'azote, par exemple, ces modules décrivent l'évolution de la disponibilité de chacun de ces éléments et des facteurs de stress qui sont engendrés par l'inadéquation aux besoins de la culture; l'effet de ces facteurs de stress sur les différents processus de la croissance et du développement est également décrit.

2.1.2 Les modèles existants adaptés à la betterave sucrière

Il y a plusieurs modèles de fonctionnement de la betterave sucrière. Certains modèles sont développés spécifiquement pour cette culture, d'autres sont adaptés de modèles élaborés pour d'autres cultures. En règle générale, ces modèles comportent les différents modules représentés sur la Figure 2-1.

2.1.2.1 Particularités biologiques de la betterave sucrière.

La betterave sucrière est une plante bisannuelle que l'on cultive, pour la production de sucre, pendant la partie végétative de son cycle. En effet, pendant la première année, la plante accumule dans son pivot une importante quantité de réserves, dont 75% de glucides (saccharose). Ces réserves servent, au cours de la deuxième année, à l'allongement des bourgeons axillaires en une ou plusieurs tiges ramifiées portant des fleurs puis des fruits secs, les glomérules (Figure 2-2).

Cette particularité entraîne des spécificités vis-à-vis de la modélisation, essentiellement sous 2 aspects:

- le développement phénologique: il se limite à la phase végétative et il a trait à la description du début de la tubérisation du pivot et de sa vitesse.
- la nature de l'organe d'accumulation des réserves: c'est un organe souterrain, le pivot, résultat de la tubérisation de la racine. Les différents organes à prendre en compte pour la répartition des assimilats sont donc: les feuilles (limbes et pétioles), le pivot (avec sa partie supérieure aérienne, le collet, zone d'insertion des feuilles) et les racines secondaires, fonctionnelles, ou racines fibreuses.

2.1.2.2 Modèle simple (Monteith)

Le modèle de Monteith (1972) peut être considéré comme l'expression la plus simple du modèle de fonctionnement de la culture. Il considère en effet la culture comme un capteur et un transformateur d'énergie solaire en matière sèche (Bonhomme *et al.*, 1995) en exprimant la production quotidienne de matière sèche d'une culture en fonction du rayonnement solaire incident grâce à une série d'efficacités. Il a été adapté par Varlet-Grancher *et al.* (1982) (Eq. 2-1):

$$\frac{\Delta MS}{\Delta t} = \varepsilon_b \varepsilon_i \varepsilon_c RG$$

Eq. 2-1.

où:

- $\Delta MS/dt$ est la production journalière de matière sèche totale de la plante ($g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$);
- ε_c est la fraction du PAR dans le rayonnement global RG incident (variable entre 0.42 et 0.50 selon le lieu et le type d'atmosphère (Varlet Grancher *et al.*, 1989; Spitters *et al.*, 1986);
- ε_i est la fraction de PAR incident qui est interceptée par le couvert (entre 0 et 1.0 selon la structure du couvert);
- ε_b est l'efficacité biologique de conversion de l'énergie de PAR intercepté en matière sèche totale, en $g \cdot MJ^{-1}$ (*radiation use efficiency, RUE, en anglais*); et
- RG est le rayonnement global incident journalier ($MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$).

Ce modèle a été beaucoup utilisé en Grande Bretagne pour étudier la capacité des cultures à produire de la matière sèche (ex: Biscoe et Gallagher, 1977; Monteith, 1977; Gallagher et Biscoe, 1978). Scott et Jaggard (1978, 1993) en ont étendu l'utilisation en l'adaptant à la production de sucre par le pivot de la betterave sucrière. En France, à la suite de Varlet-Grancher *et al.* (1982) il a été également très utilisé pour différentes cultures. Damay et Le Gouis (1993) l'ont utilisé pour comparer le fonctionnement de différents génotypes de betterave sucrière dans les conditions de la Picardie et ont trouvé des efficacités biologiques de 3.0 à 3.8 $g \cdot MJ^{-1}$.

La qualité de ce modèle simple et universel est qu'il ne requiert que peu de paramètres; ceci explique que ce modèle soit très souvent utilisé. Cependant, le principal défaut inhérent à ce modèle est que ses paramètres (essentiellement l'efficacité biologique) varient de façon non négligeable des conditions de culture, et que ses performances restent limitées. De plus, il ne comporte pas de description de la phénologie de la culture ni de module de contrainte. Par ailleurs, il ne décrit pas la répartition de la biomasse produite entre les différents organes, ce qui ne permet pas d'accéder au compartiment qui constitue le rendement (le pivot dans le cas de la betterave), ni de mettre à jour de façon dynamique l'état de l'appareil foliaire. L'application de ce modèle nécessite donc, outre une bonne estimation de l'efficacité biologique et de ses variations, une description de l'évolution de l'efficacité d'interception au cours du temps. C'est ce qui justifie son utilisation très large dans des applications utilisant la télédétection, puisque celle-ci fournit au modèle la description de l'évolution de ε_i .

2.1.2.3 Modèles plus complexes

Ce type de modèle simule de façon beaucoup plus complète les processus biophysiques de la culture et leurs interactions avec l'environnement sol-atmosphère, selon le schéma qui a été examiné précédemment (Figure 2-1). Certains modèles sont "génériques", c'est à dire qu'ils ont été développés à partir d'un même concept, avec des adaptations et un paramétrage spécifiques pour différentes espèces (ex: CERES, Ritchie, 1991; SUCROS, Spitters *et al.*, 1989; GOA, Brisson *et al.*, 1992; WOFOST, van Diepen *et al.*, 1989). D'autres sont spécifiques d'une espèce (SOYGRO pour le soja, Swaney *et al.*, 1986; Wilkerson *et al.*, 1983; AFRCWHEAT pour le blé, Porter, 1993).

Dans le cas de la betterave sucrière, plusieurs modèles ont été développés. Vandendriessche et van Ittersum (1995) en ont dressé un inventaire. Ils listent 9 modèles mécanistes dont une description succincte est donnée dans le Tableau 2-1 en fonction de critères propres aux auteurs. Il apparaît au premier ordre que les modèles diffèrent essentiellement par le nombre de processus qui sont décrits. En réalité, ils diffèrent également par les niveaux de complexité adoptés dans la description des processus, qui se traduisent généralement par le pas de temps du modèle (horaire/niveau de complexité plus grand ou journalier/complexité moins grande).

Tableau 2-1. Modèles mécanistes pour la betterave sucrière (Vandendriessche et van Ittersum, 1995).

	Model name	Unnamed 1	SUBGRO	SUBGOL	Unnamed 2	SUCROS	SIMBEET	SOWAN	SUBEMO	SIUCRA
Main objectives	scientific understanding		x	x	x	x	x	x	x	x
	hypothesis testing		x	x	x					
	forecasting	(x)	(x)	(x)	x	(x)	x	(x)	(x)	x
	management	(x)					x			
Input data	climatic	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	crop specific	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	environmental	x				(x)	x	x		
Time step	hour									
	day	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Processes treated in submodels for crop growth (see Table 2)	PHOT	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	GR & R	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	TRANSP	x	x	x		x		x	x	
	PART		x	x	x	x	x	x	x	x
	LAexp		x	x		x			x	
	DEVEL		x	x		x			x	x
	SENES			x			x		x	x
	SUGARC		x	x						
	NLTR	x					x	x		
BEEQT										
Interactions with soil	soil moisture	x				(x)		x		
	mineral nitrogen	x				(x)		x		
Computer language	FORTRAN	x				(x)	x	x	x	x
	CSMP		x			x				
	Algol			x						
	EMA				x					

References: Unnamed 1, Frere *et al.*, 1970; SUBGRO, Fick, 1971; Fick *et al.*, 1973, 1975. SUBGOL, Hunt, 1974; Hunt and Loomis, 1979; Unnamed 2, Patefield and Austin, 1971; SUCROS, van Keulen and van Laar, 1982; Spitters *et al.*, 1989; van Laar *et al.*, 1992; SIMBEET, Lee, 1983; SOWAN, Hendrickx, 1986; SUBEMO, Vandendriessche, 1989; SIUCRA, Burke, 1992

Par rapport à cet ensemble de modèles, nos propres critères, liés à l'objectif poursuivi dans ce travail, sont les suivants:

- le fait que le développement foliaire, variable d'interface avec la télédétection, et le rendement (variable liée à l'objectif) soient des variables d'état du système modélisé;
- la possibilité de prendre en compte les phases de levée et de croissance juvénile de la culture, sources de variabilité importante des rendements dans le cas de la betterave (toute autre condition étant optimale par ailleurs);
- l'homogénéité des niveaux de complexité à l'intérieur des différents modules et l'exhaustivité des fonctions décrites;
- l'existence de modules de contrainte, ou la possibilité de les incorporer;
- enfin, un dernier critère capital, la disponibilité du modèle informatique avec des garanties de qualité.

Vis-à-vis de l'ensemble de ces critères, c'est le modèle SUCROS (Spitters *et al.*, 1989; van Laar *et al.*, 1992) que nous avons retenu. Il n'est pas le plus mécaniste de tous. Le modèle le plus mécaniste, SUBGRO, propose une modélisation de la croissance des organes plus réaliste que celle proposée dans SUCROS où la croissance ne dépend que de la disponibilité en assimilats. Dans SUBGRO, cette croissance est pilotée non seulement par la disponibilité en assimilats mais aussi par le potentiel de croissance des organes (défini par classe d'âge dans le cas des feuilles) et réglé par un jeu de priorités entre les puits. Le tout est régulé par les conditions environnementales (lumière et température) et par l'état hydrique interne de la plante. Ce schéma, qui est le plus proche de la réalité, est cependant incomplet, puisque tout le processus de sénescence des feuilles, capital pour une bonne description de l'évolution de l'appareil foliaire et sa dépendance des conditions d'environnement, est absent.

Le modèle SUCROS, lui, offre une bonne adéquation entre l'exhaustivité des processus décrits (à noter que la sénescence des feuilles sous l'effet de l'âge et de l'auto-ombrage y est décrite, contrairement à ce qui est indiqué dans le Tableau 2-1) et le niveau de complexité. Par ailleurs, il offre la possibilité de décrire, à travers un ensemble de paramètres, les résultats de la phase d'implantation de la culture, ce qui n'est pas le cas des autres modèles. En outre, si SUCROS décrit la croissance et le développement d'une culture en conditions potentielles, on peut envisager la prise en compte de la contrainte hydrique: il existe une version SUCROS2 en cours d'élaboration au moment où ce travail a été commencé (Bouman, comm. pers., 1996). Enfin, SUCROS est un modèle déjà ancien, assez largement diffusé par une organisation où le suivi et l'amélioration du produit sont garantis. Il a été mis gracieusement à notre disposition par J. Goudriaan et ses collaborateurs. Nous décrivons plus en détail les différentes fonctions du modèle dans le chapitre 4.

2.1.3 La levée et la croissance juvénile de la betterave

Le climat, les conditions du sol (Dürr *et al.*, 1992), la taille des semences (Scott *et al.*, 1974, Dürr *et al.*, 1993), et les techniques culturales (choix des dates d'intervention, mode de préparation des sols, réglage des semoirs...) influencent la levée et la croissance juvénile de la culture (appelée encore

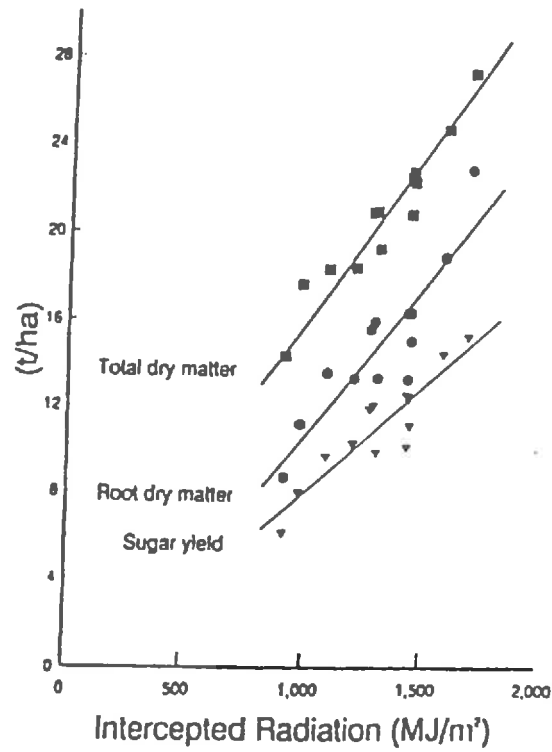


Figure 2-3. Rendement de la betterave sucrière (matière sèche totale, matière sèche de racines et sucre) en fonction de la quantité de rayonnement intercepté (Scott et Jaggard, 1992).

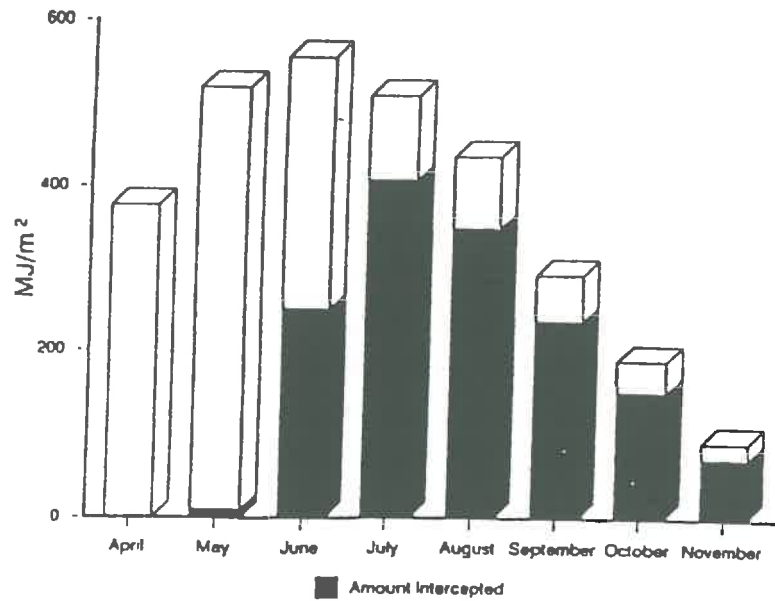


Figure 2-4. Evolution du rayonnement solaire disponible et du rayonnement intercepté (Scott et Jaggard, 1992).

phase d'implantation). Or la réalisation de cette phase détermine la vitesse d'installation de la canopée qui est un facteur primordial de réussite de la culture.

En effet, en l'absence d'autres facteurs limitants, les rendements de la betterave sont très étroitement liés à la quantité de rayonnement intercepté (Figure 2-3, Scott et Jaggard, 1992) (Monteith, 1977; Scott et Jaggard, 1978; Milford *et al.*, 1980; Damay et Le Gouis, 1993; Scott et Jaggard, 1993; Ferré et Fleury, 1994). Or le développement de la canopée est sensiblement décalé par rapport à la distribution du rayonnement solaire disponible, le maximum de développement intervenant après le maximum de rayonnement disponible (Figure 2-4). Pour maximiser les rendements, les agriculteurs ont eu tendance ces dernières années à avancer sensiblement les dates de semis. Le corollaire de cette tendance est que les opérations de travail du sol (préparation du lit de semences, semis) interviennent à des périodes où les risques de création d'obstacles pour les jeunes plantules sont augmentés. D'une part, l'humidité du sol est plus forte, or les interventions en conditions humides créent plus de grosses mottes, premier type d'obstacle et cause d'irrégularité des profondeurs de semis; d'autre part, les températures sont plus basses, entraînant un allongement de la période semis - levée des plantules, donc une augmentation de la probabilité d'occurrence de pluies et un risque accru de formation de croûtes, deuxième type d'obstacle. Sous l'effet de la variabilité des conditions de différents facteurs (qualité du lot de semences, climat, sol, techniques culturales) et de leurs interactions complexes, les résultats de la phase d'implantation sont très variables. Or la modélisation de cette phase est un aspect souvent négligé dans les modèles de croissance.

Après avoir rappelé, dans un premier temps, le déterminisme et la variabilité des processus de levée et de croissance juvénile nous analyserons dans un deuxième temps comment cette phase est décrite dans les modèles (et dans SUCROS en particulier).

2.1.3.1 Déterminisme et variabilité de la levée et de la croissance juvénile

L'ensemble des facteurs qui conditionnent la réalisation de la phase d'implantation jouent sur les quatre paramètres principaux de la croissance juvénile de la culture:

- 1) temps nécessaire à la levée d'un certain pourcentage de plantules,
- 2) taux final de levée,
- 3) état de croissance des plantules,
- 4) taux relatif de la croissance.

De plus, il y a interdépendance entre ces différents paramètres.

- La vitesse et le taux final de levée:

La vitesse de levée est généralement exprimée par l'inverse de la somme de température nécessaire à la réalisation d'un certain pourcentage du nombre final de plantes levées. Elle est influencée par les caractéristiques de l'environnement du lit de semences (humidité, température, structure). Lorsque les conditions d'humidité et de température sont favorables, les semences germent. La racicule pousse verticalement vers le bas et l'hypocotyle verticalement vers le haut. En

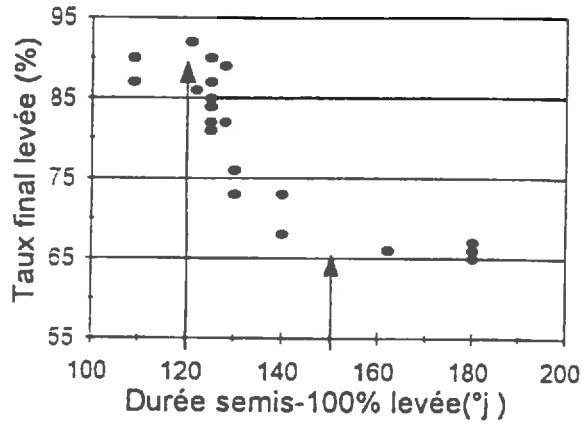


Figure 2-5. Taux final de levée en fonction de la somme de température nécessaire à levée (d'après Guérif *et al.*, 1995).

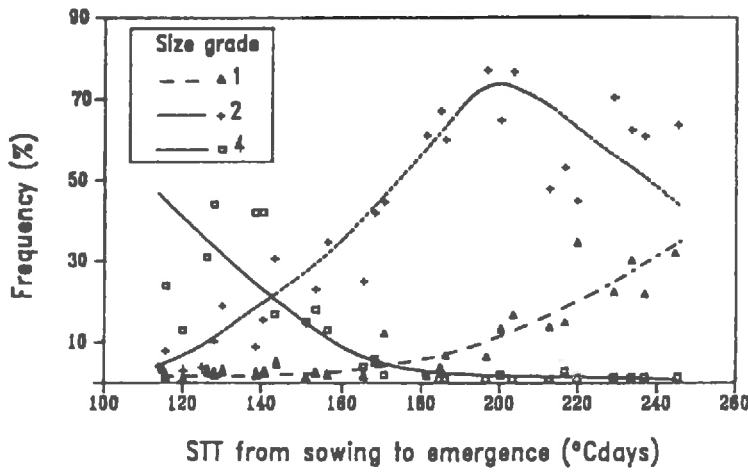


Figure 2-6. Taille des plantules à 225°Cj en fonction de la somme de température nécessaire à levée. Les plantules sont groupées par classe de taille croissante de 1 à 4 (d'après Dürr *et al.*, 1992).

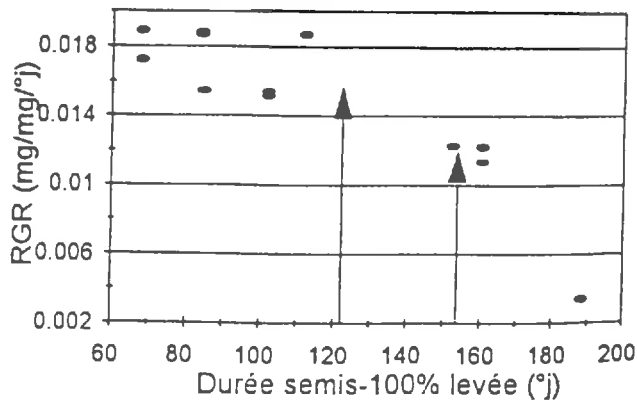


Figure 2-7. Taux relatif de croissance des plantules (RGR) en fonction de la somme de température nécessaire à la levée (Guérif *et al.*, 1995).

conditions optimales d'humidité, qui sont généralement satisfaites dans le cas des semis de betterave au printemps, la germination des semences est réalisée pour une somme de température donnée, et elle est très peu variable (environ 25-50°C·j, base 3.5°C, Dürr, comm. pers.).

Pendant la période de germination et de croissance souterraine, la croissance est hétérotrophique: elle se fait aux dépens des réserves de la semence. La vitesse de la croissance souterraine dépend de la température du sol. La durée du trajet de l'hypocotyle jusqu'à la surface peut-être rallongé si la structure du sol est grossière (présence des grosses mottes) ou si l'hypocotyle rencontre une croûte de surface (la plantule peut alors suivre un trajet horizontal sous la croûte, jusqu'à la rencontre d'une fissure, Duval et Boiffin, 1990). Les études menées en conditions d'obscurité montrent qu'en bonnes conditions, la durée semis-levée est de 65-70°C·j, base 3.5°C; en présence d'obstacles elle peut atteindre environ 150-175°C·j pour une profondeur de semis donnée (Dürr *et al.*, 1992). Au dessus de 120°C·j (Figure 2-5), les plantules non levées commencent à dépérir et le taux de levée est affecté (Dürr *et al.*, 1993).

La vitesse de croissance souterraine dépend également de la taille des semences qui est très variable. Dans un même lot, les poids secs peuvent varier d'un facteur deux (Dürr *et al.*, 1992). Les plantules issues de grosses semences sont capables de traverser la distance qui les sépare de la surface plus vite que les plantules issues des petites semences.

Cette culture de printemps est donc particulièrement sensible à la structure du lit de semence et à l'état de la surface du sol, avec des répercussions sur la vitesse de franchissement de la surface (en somme de température) et sur le taux final de levée, et donc sur la densité en plantes·m⁻².

- L'état de croissance des plantules à la levée:

Les conditions qui déterminent la vitesse et la densité de levée déterminent également l'état de la plantule à la levée. Plus la levée est lente, à cause d'une profondeur de semis importante où de présence d'obstacles (mottes ou croûtes), plus la fréquence de petites plantules est élevée (Figure 2-6). Ceci est dû, en partie, à une consommation des réserves pour la respiration et la croissance de l'hypocotyle. Le poids et la surface des cotylédons sont alors réduits au début de la croissance autotrophique (Dürr *et al.*, 1990; Dürr *et al.*, 1992) et la capacité de photosynthèse est diminuée.

- Le taux relatif de croissance des plantules (RGR):

Il y a lieu de considérer deux phases pour la croissance juvénile des plantules (cf Dürr *et al.*, 1992):

⇒ la phase cotylédonnaire, jusqu'à l'entrée en fonctionnement des première feuilles, où se fait le passage à l'autotrophie. Les cotylédons assurent la photosynthèse, mais leur taux relatif de croissance est influencé par les conditions de la réalisation de la levée: plus la durée de la levée est importante, plus les réserves de la semence et la vigueur de la plantule diminuent et le taux relatif de croissance est faible (Figure 2-7). Des expériences de laboratoire (Dürr et Boiffin, 1995) ont montré qu'une longue durée de croissance hétérotrophique diminue le taux relatif de croissance pendant la croissance autotrophique. L'effet existe aussi bien pour les plantules issues de petites ou de grosses semences, mais le taux relatif de croissance est plus fort pour les plantules venant de grosses semences.

Un effet similaire a été trouvé pour le taux d'assimilation nette journalière. Cela est dû, en partie, à une diminution des teneurs en chlorophylles a et b pour les plantules qui ont passé un temps plus long en croissance hétérotrophique.

⇒ la phase foliaire, beaucoup plus longue que la première phase, commence à partir de l'entrée en fonctionnement des premières feuilles jusqu'à la fin de la croissance exponentielle. L'état de croissance des plantules au début de cette phase est évidemment très influencé par leur histoire dans la phase précédente. Boiffin *et al.* (1992) ont montré que pendant cette deuxième phase, le taux relatif de croissance est peu variable quelles que soient l'origine et l'histoire des plantules. Ils ont trouvé une variabilité d'environ 10-15% avec des conditions de lits de semence différents, ainsi qu'une faible variabilité inter-annuelle.

Compte tenu de la durée relative des deux phases, on peut donc modéliser la croissance précoce pendant l'ensemble de la période avec un seul RGR et donc un seul état de croissance initial, très peu variable, comme cela est fait généralement (Day, 1986; Spitters *et al.*, 1989; Boiffin *et al.*, 1992). Mais la variabilité des modalités de croissance pendant la première phase doit être prise en compte dans la variabilité des états de croissance initiaux.

- Interdépendance des paramètres:

La discussion précédente illustre le poids des conditions de réalisation de la phase semis-levée sur les paramètres décrivant la levée et la croissance précoce des plantes. Il est important de noter qu'au niveau d'un peuplement, les valeurs de ces différents paramètres sont liées: alors qu'une bonne levée se traduit par une vitesse de réalisation rapide, un fort taux de levée et des tailles initiales des plantules élevées, de mauvaises conditions de levée tendront à allonger la durée de la phase semis-levée, diminuer le taux de levée (donc la densité de plantes par unité de surface), et réduire les tailles initiales des plantes.

2.1.3.2 Prise en compte de cette phase dans les modèles

Aucun des modèles existants ne décrit complètement le déterminisme de la phase d'implantation. L'exigence requise pour initialiser les processus de croissance et de développement dans le modèle est de disposer d'une date de levée et d'une surface foliaire initiale.

La date de levée est généralement déterminée par la réalisation d'une somme de températures (supérieures à une température de base) accumulée depuis le semis, ce qui revient à considérer que les vitesses de germination et de croissance souterraines de l'hypocotyle sont des fonctions linéaires de la température pour une gamme de température donnée. Cette formalisation constitue à l'évidence une vision très réductrice des processus mis en cause pendant cette période. On néglige en particulier toute possibilité de variation de la durée de la croissance souterraine de l'hypocotyle en fonction du type de lit de semences rencontré.

La notion de surface foliaire initiale, outre qu'elle constitue un paramètre très difficile à déterminer, confère une très grande sensibilité au modèle. Pour limiter cette sensibilité, certains auteurs préfèrent

initialiser le modèle à un stade plus tardif (ex. : 2 feuilles pour SUBGRO). Dans le cas de SUCROS, la croissance précoce de l'indice foliaire est découplée des processus de production d'assimilats. Comme cela est fait dans plusieurs études de la croissance juvénile, à l'échelle de la plante ou du peuplement (Day, 1986, Spitters *et al.*, 1989, Dürr *et al.*, 1992), l'évolution des états de croissance est alors décrite par une fonction exponentielle de la somme de température depuis la levée:

$$C = C_0 \exp^{RGR \cdot ST}$$

Eq. 2-2.

C'est l'état de croissance (en masse ou en surface) de la plantule ou du peuplement, C_0 est l'état de croissance initial, RGR est le taux relatif de croissance et ST la somme des températures supérieures à une température de base accumulée depuis la levée.

Cette approche considère que la réponse à la température du processus de croissance est linéaire sur la gamme de températures rencontrée et qu'une température de base est définie (Milford *et al.*, 1985a). Elle considère en outre que la croissance ne dépend que de la température et pas du rayonnement absorbé. Cette hypothèse peut-être considérée comme valide pendant cette phase de croissance juvénile pour une plante isolée jusqu'à l'apparition d'une compétition pour la lumière au sein de la plante par auto-ombrage.

Dans le cas d'un peuplement, la première simplification généralement faite dans les modèles, et dans SUCROS en particulier, consiste à décrire la culture non pas comme un ensemble de plantes pouvant avoir des comportements différents mais comme une plante moyenne. Dans ce cas, la croissance juvénile est décrite de la même façon, mais c'est la compétition entre plantes qui va limiter l'interception du rayonnement. Pour la betterave, les auteurs de SUCROS par exemple considèrent que cette compétition s'installe lorsque la culture atteint un indice foliaire d'environ 0.75 (Spitters *et al.*, 1989). Le modèle décrit donc la phase semis-levée et la phase de croissance juvénile de l'indice foliaire de la culture par ce type de fonction exponentielle, et met en jeu 4 paramètres:

- la somme de température nécessaire pour qu'un certain pourcentage de plantules aient levé (SEMERG, °C.j, base 3°C);
- le nombre de plantes levées par unité de surface (NPL, plantes·m⁻²);
- la surface initiale des feuilles (LA0, cm²·plante⁻¹); et
- le taux relatif de croissance en surface des feuilles (RGRL, °C⁻¹·j⁻¹).

S'il ne comporte pas de modélisation du déterminisme de la phase d'implantation, SUCROS permet, grâce à cet ensemble de paramètres, de quantifier les conséquences de conditions d'implantation contrastées.

Brochery (1996) a réalisé cette quantification. A partir des résultats de Boiffin et Dürr, en prenant comme base une densité de semis de 130 000 semences par hectare, elle a calculé les jeux de paramètres caractérisant trois types d'implantations contrastées (Tableau 2-2).

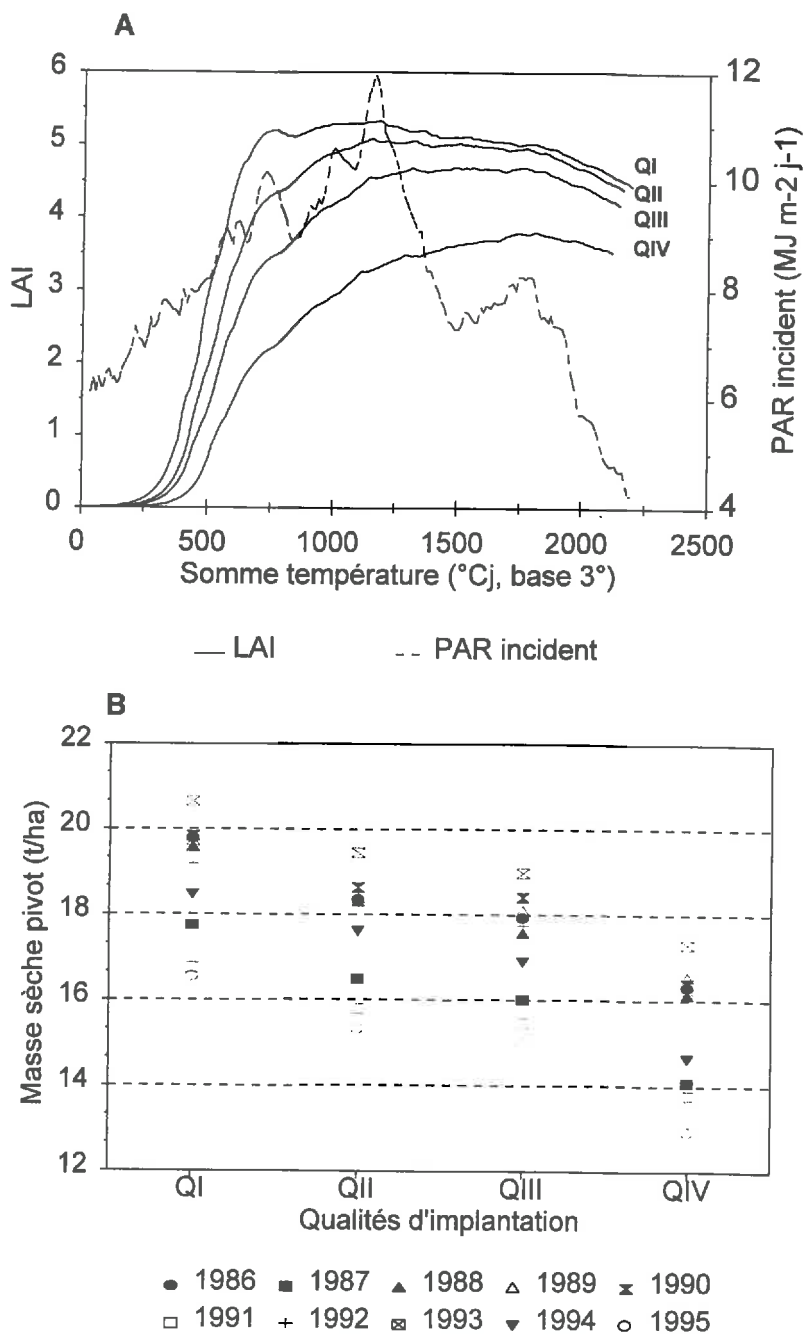


Figure 2-8. Simulations de la croissance et du rendement de la betterave avec le modèle SUCROS pour différents qualités d'implantation (cf. texte). A) LAI et PAR incident 1993(---); B) Rendements (matière sèche racine) pour 10 années de simulation (Brochery, 1996).

Tableau 2-2. Jeux de paramètres correspondant à différentes qualités d'implantation.

Qualité d'implantation	Taux de levée (%)	SEMERG (°C·j)	NPL (plantes·m ⁻²)	LA0 (cm ² ·plante ⁻²)	RGRL (°C ⁻¹ ·j ⁻¹)
QI Bonne	95.	73.0	12.0	2.25	0.0156
QII Moyenne	75.	110.0	9.0	1.51	0.0156
QIII SUCROS (défaut)	85.	120.0	11.0	0.84	0.0156
QIV Mauvaise	50.	147.0	6.0	0.49	0.0156

On constate que les valeurs par défaut considérées dans SUCROS, sont bien encadrées par les valeurs extrêmes que nous avons définies indépendamment et suivent la même logique (un SEMERG supérieur s'accompagne d'un LA0 plus faible). La seule discordance concerne le nombre de plantes par m² (11.0), et le taux de levée qui en dérive par calcul par rapport à notre référence, trop élevé pour des conditions "moyennes": cela peut s'expliquer par des densités de semis probablement plus fortes pratiquées aux Pays bas.

La Figure 2-8a montre, pour une année particulière, les conséquences de ces conditions contrastées sur l'installation du couvert foliaire. On constate que les mauvaises conditions d'implantation (QIV) provoquent un retard et une limitation très nets de l'installation du couvert foliaire. Ces effets sur le développement foliaire se traduisent par des diminutions des rendements finaux: c'est ce que l'on constate à la Figure 2-8b où l'on a représenté les rendements (poids secs de pivots) obtenus avec les différentes conditions d'implantation pour une série de 10 années climatiques. Les effets sont loin d'être négligeables, puisque la différence entre une bonne et une mauvaise implantation est de l'ordre de 20%, ce qui justifie pleinement l'intérêt porté à cette question dans ce travail.

2.1.3.3 Conclusions partielles

Les conséquences de la phase d'implantation sur le développement du couvert et le rendement sont importantes. On vient de voir que, même si les conditions de croissance sont optimales pendant toute la saison, l'effet de la phase d'implantation va introduire une variabilité dans l'implantation du couvert, qui se répercute ensuite sur le rendement. Or cet aspect est mal pris en compte dans les modèles de simulation de cultures pour qui l'importance de cette phase est sous-estimée. Dans le cas de SUCROS, les paramètres descriptifs des résultats de la phase semis-levée et des caractéristiques de la croissance précoce de la culture existent mais doivent être connus a priori.

Pour que le modèle simule correctement le comportement de la culture en toute situation, ces paramètres doivent être renseignés.

Un simulateur de levée est en cours de développement (Dürr *et al.*, 1995) qui a pour objectif de modéliser la distribution des dates de levée, le taux final de levée, et les paramètres de la courbe de croissance des plantules jusqu'au stade de la première paire de feuilles. Ce modèle, à la fois stochastique et mécaniste, utilise des variables d'entrée et des lois concernant aussi bien les caractéristiques des semences (vitesse d'élongation de l'hypocotyle en fonction de la température, seuil de mortalité en fonction du temps passé sous terre...), que du sol (taille et distribution des agrégats, sensibilité à la battance...), du climat (température du sol, pluies), et des techniques

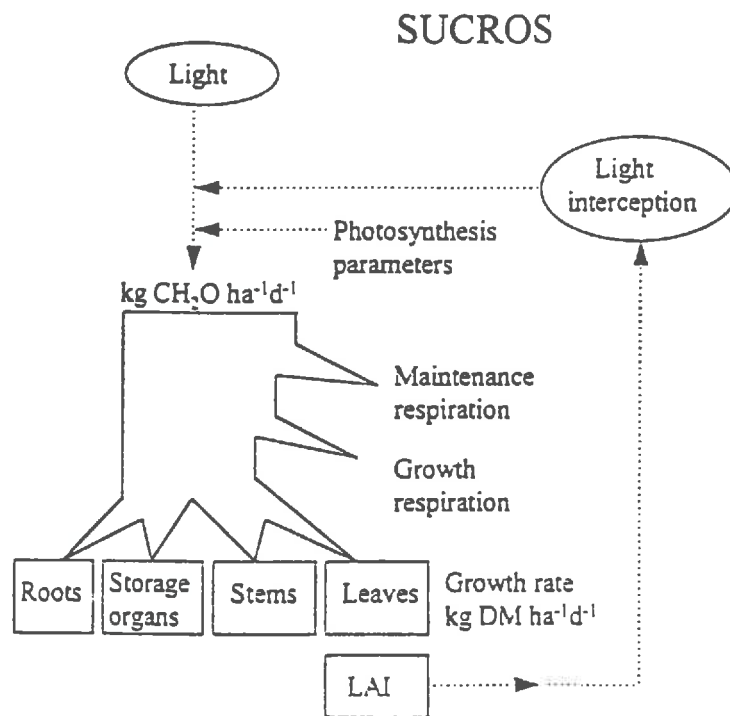


Figure 2-9. Schéma simple du fonctionnement du modèle SUCROS (van Leeuwen, 1996).

culturelles (distribution des profondeurs de semis). On pourrait envisager à terme d'utiliser un tel outil pour dériver une formalisation plus simple de ces processus et l'inclure dans le modèle de culture.

En attendant qu'une telle amélioration puisse être apportée aux modèles de culture, la télédétection constitue un outil privilégié pour permettre d'accéder à une bonne description des paramètres de la levée et de la croissance juvénile.

2.1.4 Conclusion: choix du modèle de fonctionnement de la culture

Le modèle SUCROS nous a paru particulièrement bien adapté à notre objectif.

- La modélisation mécaniste de SUCROS permet de simuler la croissance et le développement de la betterave avec un niveau de détail suffisant pour expliquer l'état de croissance des organes au pas de temps journalier et à l'échelle de la parcelle. Il a un niveau de complexité satisfaisant et homogène dans les différents modules.
- Sa paramétrisation de la phase d'implantation, avec un nombre suffisant de paramètres, permet de bien caractériser cette phase importante pour la croissance ultérieure, et se prête particulièrement au ré-étalonnage régional par télédétection, pour des conditions au champ très variables. Le LAI est la variable d'état clé, qui permet de faire le lien avec les modèles de transfert radiatif.

Les avantages liés à l'ancienneté de SUCROS et à sa large utilisation sont intéressants pour nous:

- Ce modèle en conditions potentielles pourra être relativement facilement étendu aux conditions avec contraintes hydrique et minérale. Il existe une version simulant le fonctionnement de la culture sous contraintes hydrique et minérale dans le cas du blé (van Laar *et al.*, 1992; van Keulen, 1982). De même, ce modèle a été couplé à un modèle de développement des parasites dans une approche intégrée hôte-parasite (Rabbinge et Bastiaans, 1989).

Il existe différentes versions adaptées à différentes cultures, ce qui permet d'envisager une transposition assez facile de nos résultats à d'autres cultures.

2.1.5 Description générale de SUCROS

Le modèle fonctionne à un pas de temps journalier, il simule, d'une manière mécaniste, les fonctions biophysiques classiques de la croissance et du développement de la culture. SUCROS simule la croissance potentielle en utilisant les données climatiques (rayonnement, température) et les caractéristiques de la culture. La Figure 2-9 illustre un schéma simple du fonctionnement de SUCROS. Le profil du rayonnement (i.e. PAR), pour un LAI donné, est décrit par la loi d'atténuation de Beer avec un coefficient k . L'absorption locale du PAR est calculé à trois niveaux dans le couvert. A ces trois niveaux, la photosynthèse est déterminée par une réponse photosynthèse-PAR d'une feuille. La photosynthèse instantanée du couvert est donnée par l'intégration des trois calculs de photosynthèse locale. Pour mieux prendre en compte la variabilité d'intensité du PAR journalier, la photosynthèse journalière est calculée par l'intégration de la photosynthèse instantanée à trois hauteurs du soleil, et pas seulement avec un PAR moyen journalier.

Une partie de la production journalière des assimilats est utilisée pour les respirations de maintenance et de croissance. Les assimilats qui sont libres pour la croissance sont répartis vers les différents organes de la plante selon le stade de développement. Le développement, ou âge physiologique, se mesure par une somme de température en base 2°C. Le taux de croissance net des organes est le bilan (différence) entre le taux de croissance et le taux de sénescence. La croissance nette du LAI, une variable importante pour le lien avec la télédétection, est calculée à partir de la croissance nette des feuilles et d'un coefficient qui transforme la croissance de matière sèche en surface. Le nouveau LAI sert à l'absorption du PAR à la prochaine journée.

2.2 La télédétection dans le domaine optique

La télédétection des surfaces biologiques mêle l'étude des caractéristiques d'énergie réfléchie avec une certaine résolution spectrale, spatiale, et temporelle (Lillesand et Kiefer, 1987). Le domaine optique comprend les régions de longueurs d'ondes ultraviolet, visible, proche et moyen infrarouge.

La variabilité de la transmission et de l'absorption de l'énergie dans l'atmosphère dépend de la longueur d'onde et des propriétés des gaz, de la vapeur d'eau, et des aérosols, (Lillesand et Kiefer, 1987). Les fenêtres de faible diffusion ou absorption du rayonnement par l'atmosphère dans le visible et l'infrarouge permettent de "voir" la surface avec des capteurs aéroportés ou satellitaires, avec un minimum de perturbation du trajet des photons. Dans le domaine optique, la présence de nuages ou de brouillard élimine la possibilité de mesurer la surface.

Chaque surface a des propriétés spectrales (dépendant de la longueur d'onde λ) d'absorptance, α , de réflectance, ρ , et de transmittance, τ , qui satisfont l'équation (Molenaar, 1993):

$$1 = \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda)$$

Eq. 2-3.

L'analyse de ces propriétés avec une résolution spectrale fine permet de bien déterminer les caractéristiques optiques de la surface. Une haute résolution spatiale des mesures permet de caractériser la taille, la position et la variabilité spatiale horizontale des objets vus.

Les propriétés optiques des feuilles et leur arrangement spatial interviennent dans les processus d'absorptance dans le domaine du PAR pour le fonctionnement des cultures (cf 1.1). Elles interviennent de la même manière dans les processus de réflectance. La mesure de la réflectance dans des bandes spectrales spécifiques est en effet un moyen d'accéder, à l'aide de modèles de transfert radiatif, à des informations sur des caractéristiques intrinsèques des surfaces visées (développement foliaire, propriétés optiques des éléments, ...), celles des couverts agricoles par exemple. Ce moyen de mesure s'est largement développé avec la télédétection satellitaire qui permet d'acquérir une évolution temporelle de ces caractéristiques sur de grands domaines d'espace, avec une résolution satisfaisante, et des mesures de la surface non destructives (Buiten, 1993).

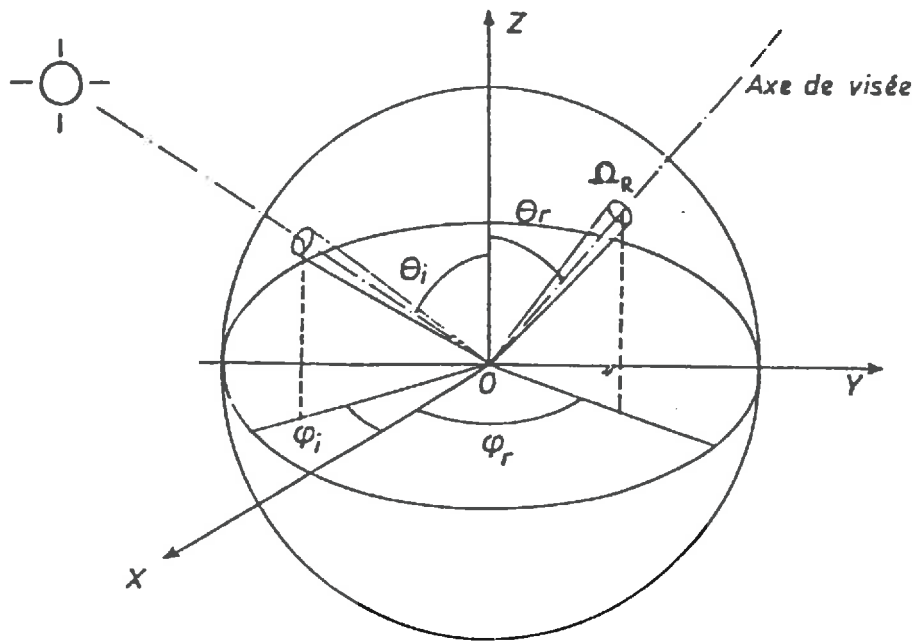


Figure 2-10. Le concept de réflectance bidirectionnelle. θ_r, φ_r : angles zénithal et azimutal de la visée; θ_i, φ_i : angles zénithal et azimutal de l'éclairement (d'après Guyot, 1989).

2.2.1 Le principe de la réflectance

Le terme général facteur de réflectance directionnelle définit "le rapport du flux énergétique réfléchi par un élément de surface dans un cône, dont le sommet est sur l'élément de surface, au flux énergétique qui serait réfléchi dans le même angle solide par un réflecteur diffusant parfait et recevant le même éclairage. Cette définition ne dépend pas de la géométrie d'éclairage" (Guyot, 1989).

Ainsi l'équation de définition du facteur de réflectance (R) s'écrit pour une surface diffusante blanche lambertienne (Guyot, 1989):

$$R = \frac{\int L_R(\theta_R, \varphi_R) \cos \theta_R d\Omega_R}{L_W \int \Omega_R \cos \theta_R d\Omega_R} = \frac{\overline{L_R}(\Phi_R)}{L_W}$$

Eq. 2-4.

dans laquelle L_R est le flux énergétique réfléchi (luminance) mesuré dans l'angle solide Ω_R , L_W est la luminance de la surface blanche, et Φ_R est le flux énergétique réfléchi (généralement mesuré en $W \cdot m^{-1}$). Les autres symboles se trouvent dans la Figure 2-10.

La réflectance peut-être définie par rapport à l'éclairage incident hémisphérique, E_i , et non pas par rapport à la luminance d'un réflecteur parfait (Guyot, 1989). Dans ce cas, l'éclairage incident hémisphérique, E_i , est égal à:

$$E_i = \pi \cdot \Omega_0 \cdot L_W$$

Eq. 2-5.

(avec $\Omega_0 = 1sr$).

En substituant L_W par $E_i / \pi \Omega_0 L_W$ dans l'Eq. 2-3, on définit alors une réflectance directionnelle-hémisphérique:

$$R = \frac{\pi L_R(\Omega_R)}{E_i}$$

Eq. 2-6.

On définit également une réflectance bidirectionnelle lorsque l'on considère les deux directions définies par le soleil (θ_i, φ_i) et la visée par un radiomètre ou satellite (θ_R, φ_R). L'éclairage solaire reçu a une composante directe, dans la direction (θ_i, φ_i), mais également une composante diffuse provenant de l'ensemble de la voûte céleste. Si les mesures sont effectuées pendant les belles journées, l'influence du rayonnement diffus peut-être considéré comme négligeable, et la réflectance bidirectionnelle s'écrit alors (Guyot, 1989):

$$R \approx \frac{\pi \overline{L_R}(\Omega_R)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

Eq. 2-7.

2.2.2 Les moyens de mesure

Depuis les années 1970, une série de satellites scrute régulièrement la surface de la terre dans les longueurs d'ondes du domaine optique. Les plus utilisés sur les surfaces agricoles sont la série américaine de LANDSAT et la série européenne de SPOT avec des hautes résolutions spatiales (30m

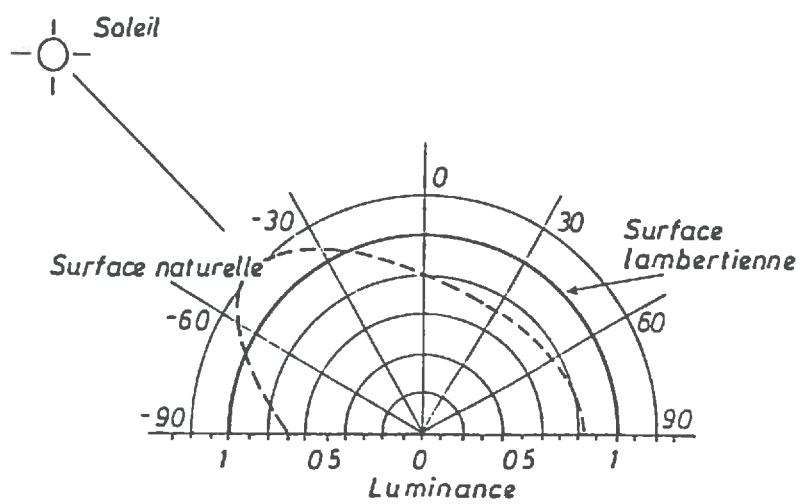


Figure 2-11. Indicatrices de luminance d'une surface lambertienne et d'une surface naturelle (Guyot, 1989).

et 20m respectivement). Une autre série très utilisée est celle des satellites météorologiques NOAA avec leur basse résolution spatiale (1.1km) mais avec leurs très haute résolution temporelle (Lillesand et Kiefer, 1987). D'autres satellites, avec des configurations de sensibilités de longueurs d'ondes, d'orbite, et de résolution spatiale différentes, sont aussi utilisés, notamment les satellites radar (ex: ERS-1: CEE; Radarsat: Canada; JERS: Japon).

Les satellites à haute résolution spatiale ont une faible fréquence de mesure au même endroit. C'est un problème, en particulier lorsque l'on souhaite réaliser la mesure à un moment précis. Des capteurs de télédétection aéroportés (Pushbroom-CNES: France; MEIS-II et CASI: Canada; AVIRIS: E.U.; CAESAR: Pays-bas) offrent la possibilité d'un meilleur choix de la date de mesure et d'une très haute résolution spatiale, mais la surface de terre mesurée est limitée. Les radiomètres de terrain donnent la plus grande flexibilité de la configuration d'une mesure, mais leur utilisation est locale.

Les radiomètres de terrain mesurent la luminance et l'éclairement très proche de la surface (<10m) et le rapport des deux donne la réflectance. Par contre, les capteurs des satellites ou des avions mesurent la luminance seulement. Leurs données doivent être exprimés en réflectance et corrigées des effets atmosphériques en utilisant les cibles de références avec une réflectance connue (Leroy, 1990; Molenaar, 1993) ou par la modélisation des effets atmosphériques (Gu, 1991).

2.2.3 Déterminants de la réflectance

On distinguera les facteurs liés à la configuration des mesures (facteurs externes) et les caractéristiques de la surface mesurée (facteurs liés à la végétation et au sol). Les premiers sont généralement considérés par les utilisateurs comme des facteurs perturbateurs de l'interprétation, les seconds constituent les caractéristiques de la végétation qui sont intéressantes et que l'on essaie généralement de retrouver à partir des mesures de télédétection.

On a volontairement exclu des facteurs déterminant la mesure de la réflectance les caractéristiques de l'atmosphère qui interviennent dans les mesures aéroportées et satellitaires dont l'utilisation n'est pas abordée dans le cadre de ce travail.

2.2.3.1 Facteurs externes

La géométrie de mesure:

La réflectance est sensible aux angles de visée et d'éclairement parce que les surfaces végétales et les sols ne sont pas des diffuseurs lambertiens (Kimes et Kirchner, 1982; Myneni *et al.*, 1987; Jacquemoud, 1992). Il y a une dissymétrie de la réflectance autour d'un point de la culture par rapport aux angles azimutaux et zénithal (Figure 2-11). Le facteur de réflectance est le plus fort quand les angles θ_i et θ_R et les angles φ_i et φ_R deviennent proches (Figure 2-10). Dans cette configuration, les rayons incidents et ceux de la visée deviennent parallèles avec moins d'ombrage vu (Baumgardner *et al.*, 1985; Guyot, 1989). Cet effet, nommé "hot spot", est expliqué par la fréquence bidirectionnelle des trous et les tailles des feuilles dans un couvert (Kuusk, 1993). Les caractéristiques du hot spot sont

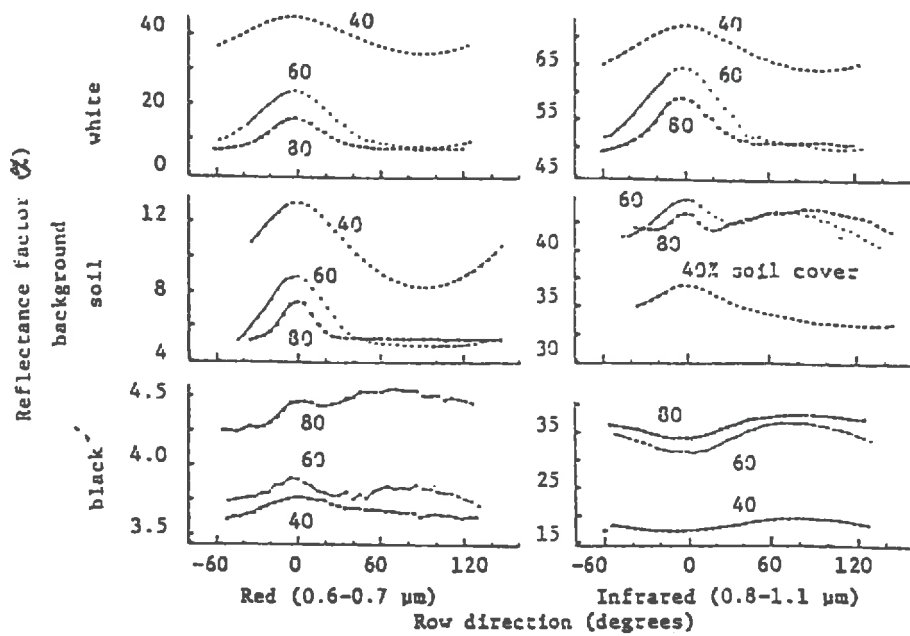


Figure 2-12. Variation du facteur de réflectance (rouge, proche infrarouge) d'un couvert de soja avec la différence d'azimut entre direction des rangs et direction du soleil (pour 3 fonds différents: tissu blanc ou noir ou sol et 3 taux de couverture du sol: 40, 60 et 80%; l'angle solaire varie entre 24 et 36%) (Vanderbilt et al., 1981).

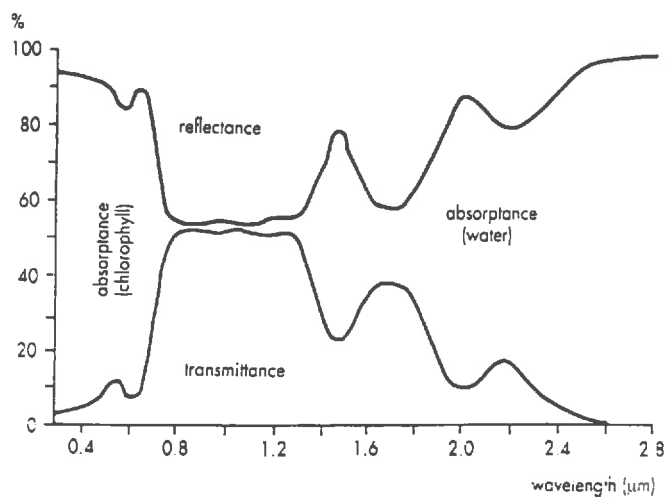


Figure 2-13. Réflectance, absorbance et transmittance d'une feuille verte vigoureuse en fonction de la longueur d'onde (Knipling, 1970).

variables pour les longueurs d'onde visible et PIR parce que les caractéristiques de transmittance des feuilles sont différentes dans ces longueurs d'ondes, donc la propagation des ombres est différente.

Nébulosité:

La fraction de rayonnement diffus dans le rayonnement total incident dépend des conditions atmosphériques: vapeur d'eau et aérosols qui diffusent une fraction des photons, notamment dans les courtes longueurs d'onde, mais aussi dans certaines bandes spécifiques du moyen infrarouge. Le facteur de réflectance des plantes et du sol est influencé par l'effet d'ombrage dû à la nébulosité. Lorsque la proportion de rayonnement diffus est importante, les plantes et les aspérités de la surface sont éclairées uniformément de tous les côtés et il n'existe pas d'ombrages bien tranchés. Lord *et al.* (1985) ont montré une augmentation de 10% de la réflectance sous les ciels couverts. Sous les ciels couverts, la proportion de la surface visée du couvert sans ombre est moins importante que lorsque le couvert est bien ensoleillé.

Autres facteurs:

Un autre facteur important de réflectance est l'orientation des rangs des cultures (Vanderbilt *et al.*, 1981). Un angle solaire azimutal d'environ 0° par rapport au rang augmente la fraction du sol éclairé et la contribution de sa réflectance à la réflectance du couvert. La variabilité est plus forte pour une couverture du sol intermédiaire que pour un couvert complet (Figure 2-12). Pour les mêmes raisons que celles invoquées pour le phénomène du hot spot, l'effet de l'orientation est plus évident dans le visible que dans le PIR.

2.2.3.2 Facteurs liés à la végétation

Propriétés optiques des feuilles:

Les feuilles représentent les surfaces principales dans les cultures; les autres organes (tiges, pétioles, fleurs, etc.) sont rarement pris en compte dans les mesures même s'ils affectent fortement la réflectance (ex: les fleurs de colza). Leurs propriétés optiques caractéristiques, dans le domaine visible et proche infrarouge sont illustrées à la Figure 2-13.

Le visible (400-700nm): Dans ce domaine du rayonnement utile à la photosynthèse, il y a une forte absorption de l'énergie incidente par les pigments foliaires (chlorophylles a et b, carotène, xanthophylle et anthocyanes). Les chlorophylles a et b représentent environ 65% des pigments des plantes supérieures et absorbent préférentiellement dans le bleu et le rouge respectivement (Knipling, 1970; Guyot, 1984). C'est pourquoi il y a une réflexion légèrement plus forte dans le vert. La forte absorption fait que la réflectance et le transmittance sont faibles dans ce domaine (la réflectance d'une feuille de blé est de l'ordre de 12, 5, et 50% dans le vert, rouge, et proche infrarouge respectivement).

Le proche infrarouge (700-1300nm): Ce domaine est marqué par de très fortes transmittance et réflectance (environ 45-50%), et quasiment aucune absorption. Les pigments et la cellulose qui constitue les parois cellulaires sont transparents à ces longueurs d'onde et les processus de diffusion multiple sur les parois sont prépondérants. La réflectance est plus élevée avec des feuilles plus épaisses et avec des tissus constitués de cellules aux formes irrégulières (Guyot, 1989).

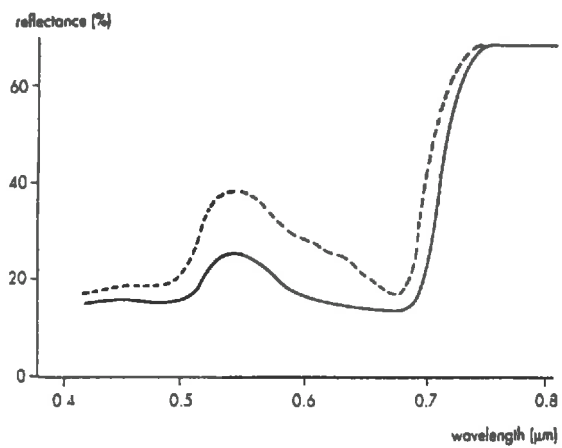


Figure 2-14. Variation de la réflectance d'une feuille due au stress causé par le gaz ozone (la courbe pleine correspond à une feuille vigoureuse, la courbe en pointillé correspond à une feuille stressée) (Horler *et al.*, 1983).

Ces propriétés optiques de la feuille évoluent avec l'âge et l'état physiologique. La teneur en pigments et en eau, et l'épaisseur des feuilles varient en effet selon l'âge de la feuille mais aussi avec les conditions d'alimentation hydrique et minérale, et bien évidemment avec l'état sanitaire. La modification des propriétés optiques des feuilles sous l'effet de stress ou de maladies est mesurable par la mesure de leur réflectance (Figure 2-14). Cela renseigne sur les conditions de croissance de la culture (Eikenaar, 1993; Peñuelas *et al.*, 1994; Guérif *et al.*, 1995). Les facteurs de stress sont responsables des plus fortes variabilités des réflectances de la gamme 550-600nm et à 700nm (Carter, 1994).

Modélisation des propriétés optiques des feuilles

La structure et les éléments constitutifs de la feuille contribuent à ses caractéristiques de réflectance et transmittance spectrales dans les courtes longueurs d'onde. Jacquemoud et Baret (1990; Jacquemoud., 1992) ont proposé une modélisation simplifiée de cette contribution, représentant la feuille comme un empilement de couches. Le modèle PROSPECT utilise trois variables d'entrée: un indice décrivant la structure interne du mésophylle (i.e. N couches), une concentration en chlorophylles a et b (en $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), et une épaisseur équivalente en eau de la feuille exprimée en cm. La structure du mésophylle d'une Monocotylédone (Graminées) est généralement plus fine et homogène; le mésophylle d'une Dicotylédone est généralement plus épais et hétérogène. On a vu que les chlorophylles étaient essentiellement responsables de l'absorption dans le visible. Le contenu en eau de la feuille est important car l'eau a des bandes de forte absorption dans certaines longueurs d'onde, notamment le moyen infrarouge. Les autres constituants biochimiques ne sont pas pris en compte car leurs effets sur les propriétés optiques sont en partie occultés par ceux de l'eau (Jacquemoud, 1992). En connaissant ces trois caractéristiques de la feuille, le modèle permet de simuler ses propriétés optiques.

- Structure du couvert: La réflectance est très sensible à la structure du couvert. La structure du couvert est généralement caractérisée par 2 types de grandeurs: un indice de surface foliaire LAI et une distribution d'inclinaison des feuilles. Le LAI peut atteindre des valeurs de 6 à 10 pour les cultures, et des valeurs encore plus élevées pour les forêts. L'inclinaison des feuilles est variable dans le couvert et aussi dans le temps, selon les caractéristiques de l'espèce et les conditions de croissance. Les distributions de fréquence des angles peuvent être décrites par des fonctions différentes: uniforme, sphérique à un paramètre (de Wit, 1965), bêta à deux paramètres (Goel et Strebel, 1984), ou d'autres fonctions de distributions (voir Bunnik, 1978). Un couvert planophile (angle moyen qui approche 0°) couvre plus de surface qu'un couvert érectophile (angle moyen qui approche 90°) pour un LAI donné, donc la réflectance du sol a moins d'importance.

2.2.3.3 Facteurs liés au sol

Les propriétés spectrales du sol dépendent de sa composition minérale et de sa teneur en matière organique, de sa texture, de son humidité et de sa rugosité.

A l'échelle d'un cycle de culture, la composition minérale, la teneur en matière organique et la texture d'un sol sont des caractéristiques figées, qui ne dépendent que du type de sol (et pourraient être déduite d'une carte des sols pour peu que l'on dispose du référentiel nécessaire). Baumgardner *et al.*

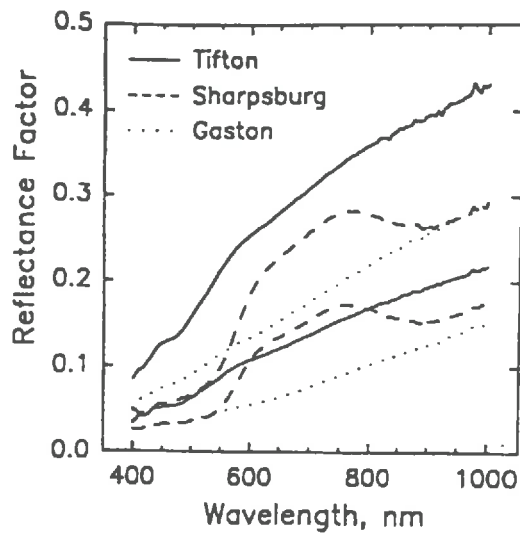


Figure 2-15. Variation de la réflectance de 3 types de sols (Tifton, Sharpsburg, Gaston) avec la longueur d'onde (les courbes supérieures correspondent au sol sec, les courbes inférieures correspondent au sol humide (Daughtry *et al.*, 1995).

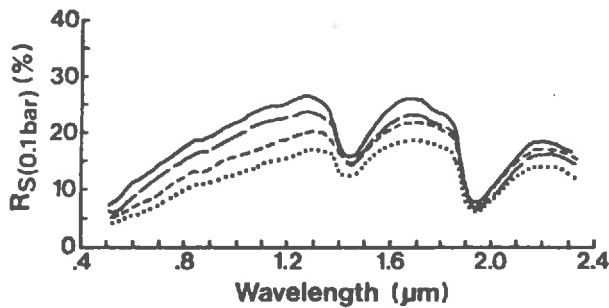


Figure 2-16. Variation de la réflectance avec la longueur d'onde pour différentes textures de sol (courbes supérieur à inférieur: sable fin, argile sableux fin, argile sableux, sable limoneux) (Baumgardner *et al.*, 1985).

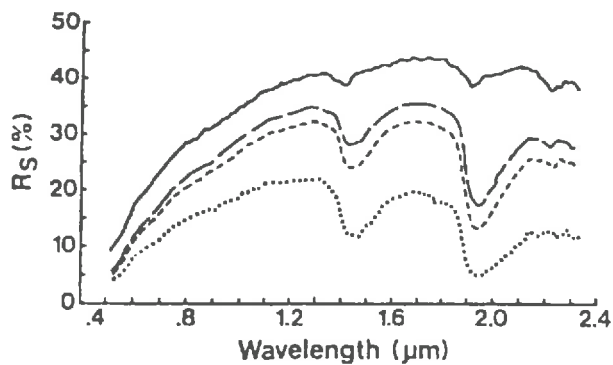


Figure 2-17. Variation du spectre de réflectance d'un sol en fonction de son humidité (courbes supérieur à inférieur: séché en étuve, 15bar, 0.3bar, 0.1bar) (Baumgardner *et al.*, 1985).

(1985) ont dressé un inventaire des réflectances de différents sols. Généralement, quand la teneur en matière organique augmente, la réflectance diminue partout dans la gamme de longueur d'onde 400-2500 nm. Ce phénomène est plus marqué pour des matières très fines par rapport à des matières peu dégradées (Figure 2-15). Les sols de texture fine ont des réflectances supérieures aux sols à texture plus grossière (Figure 2-16). La réflectance varie inversement avec le diamètre des particules (Baumgardner *et al.*, 1985).

Par contre, pour un type de sol donné, l'humidité est très variable selon les conditions climatiques, et la variation temporelle de la rugosité de surface est due aux effets combinés des techniques culturales et des facteurs climatiques (pluie, gel...).

L'humidité diminue la réflectance dans la gamme de 400-2500nm, à cause de l'augmentation des réflexions internes dans la pellicule d'eau autour des particules du sol, d'un changement de la nature de ces particules de sol en présence d'eau, et aussi de l'absorption du rayonnement par l'eau elle-même. La diminution de la réflectance du sol par augmentation de son humidité est relativement stable dans la gamme 400-1000 μ m (Figure 2-17). On constate, pour une humidité donnée, qu'il existe une relation linéaire entre les réflectances à différentes longueurs d'ondes. Cette caractéristique, qui a conduit au concept de "droite des sols" (Figure 2-18) permet d'estimer la réflectance dans une longueur d'onde à partir d'une mesure dans une autre longueur d'onde et a des applications dans la construction d'indices de végétation particuliers (cf plus loin).

La rugosité, responsable de l'anisotropie de la réflectance des sols, joue sur l'ensemble du domaine spectral. Les surfaces rugueuses (i.e. comportants des agrégats de sol de diamètre important, ou des fissures...) réfléchissent moins que des surfaces constituées par de fins agrégats ou avec une croûte. La présence de fissures ou d'agrégats de diamètre important crée de l'ombrage et donc des zones de réflectance plus faible. La réflectance d'un sol rugueux est donc plus élevée quand la direction de visée est parallèle à la direction d'illumination. Plusieurs modèles de réflectance du sol ont été développés. Ceux de Hapke, (1977), Pinty *et al.* (1989) et Jacquemoud (1992) utilisent des modèles de transfert radiatif pour simuler la réflectance. Le modèle de den Dulk (1989) utilise des méthodes géométriques.

2.2.4 Indices de végétation

Plusieurs indices ont été proposés pour rendre les mesures de télédétection moins sensibles aux facteurs externes. Pour ce faire, l'hypothèse est que les niveaux de perturbations affectent également la réflectance dans les différentes bandes spectrales: la création d'indices - le plus souvent à partir des réflectances Rouge et PIR- a visé essentiellement à réduire les effets du sol et des perturbations atmosphériques. Cependant, en pratique, les indices restent sensibles, à des degrés variables, à la réflectance du sol, la géométrie du couvert, la configuration de mesure et les conditions atmosphériques.

Certains indices comme le simple ratio et le Normalized Difference Vegetation Index sont équivalents à la mesure d'un angle:

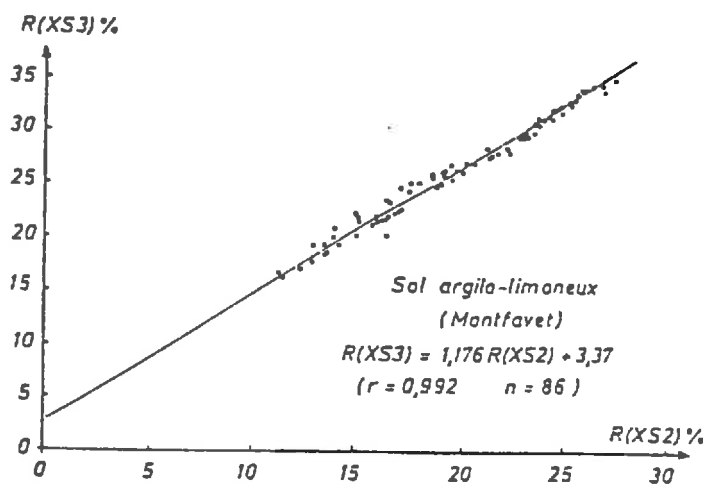


Figure 2-18. Illustration du concept de droite des sols pour un sol particulier (Guyot, 1989).

$$\text{Ratio} = \rho_{\text{PIR}} / \rho_{\text{R}} \quad (\text{Pearson and Miller, 1972})$$

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}}) \quad (\text{Rouse et al., 1974})$$

D'autres indices ont été développés à partir du concept de la droite des sols, exprimant le fait que les réflectances spectrales d'un sol dans le visible et le proche infra rouge varient linéairement les unes en fonction des autres et que cette relation est vraie quelle que soit l'humidité du sol:

$$\rho_{\text{PIR}} = a \cdot \rho_{\text{R}} + b, \text{ où } a \text{ et } b \text{ peuvent varier légèrement selon le type de sol.}$$

Des exemples de ces indices sont le Perpendicular Vegetation Index développé par Richardson et Wiegand (1977) et qui représente la distance entre un point dans le plan (PIR, R) et la droite des sols, l'indice Greenness (GVI; Kauth et Thomas, 1976), et le Weighted Difference Vegetation Index (WDVI; Clevers, 1989).

$$\text{PVI} = (1 / (a2 + 1)^{0.5}) \cdot (\text{WDVI} - b), \text{ et}$$

$$\text{WDVI} = \rho_{\text{PIR}} - a \cdot \rho_{\text{R}}.$$

Des indices de type pente ont été proposés qui incorporent l'information droite du sol Le Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI; Huete, 1988) est construit à partir du NDVI en ajoutant une constante, L, qui est une fonction de la densité du couvert:

$$\text{SAVI} = [(\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}} + L)] (1 + L)$$

SAVI est égal à NDVI si L=0, et à PVI quand L tend vers l'infini. L=0.5 est le meilleur ajustement pour des couverts de densité intermédiaire (Baret et Guyot, 1991). SAVI suppose a=1 et b=0, ce qui n'est pas toujours le cas. Pour améliorer les performances de SAVI pour l'estimation de faibles LAI, Baret et Guyot (1991) ont proposé le Transformed SAVI:

$$\text{TSAVI} = a \cdot (\rho_{\text{PIR}} - a \cdot \rho_{\text{R}} - \rho_{\text{PIR}}) / (a \rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}} - a \cdot b + X \cdot (1 + a2)),$$

où X (ajustée à 0.08) est l'abscisse négative pour $\rho_{\text{PIR}}=0$ de la droite des sols. TSAVI est égal à zéro pour les sols nus.

Les perturbations atmosphériques introduisent de la variabilité dans les mesures de télédétection réalisées par avion ou par satellite. Pinty et Verstraete (1992) ont proposé le Global Environmental Monitoring Index (GEMI) qui incorpore une correction empirique standard pour les effets atmosphériques.

$$\text{GEMI} = \eta(1. - 0.25\eta) - ((\rho_{\text{R}} - 0.125) / (1. - \rho_{\text{R}}))$$

où

$$\eta = [2(\rho_{\text{PIR}}^2 - \rho_{\text{R}}^2) + 1.5\rho_{\text{PIR}} + 0.5\rho_{\text{R}}] / (\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}} + 0.5).$$

GEMI a été trouvé peu sensible à la brillance du sol (Leprieur et al., 1994). Son principal avantage sur les autres indices apparaît pour les pourcentages de couverture élevés (i.e. LAI forts) et pour les sols clairs et foncés (Leprieur et al., 1994).

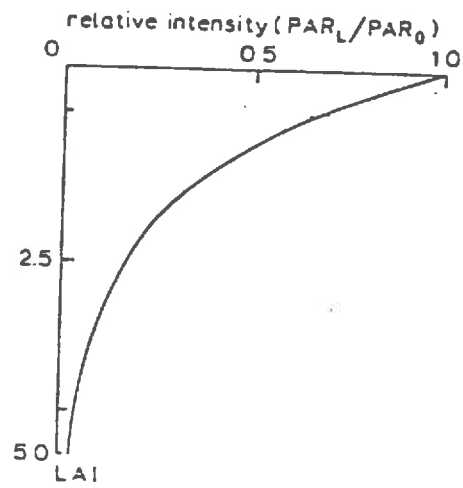


Figure 2-19. Atténuation du PAR en fonction de la profondeur dans le couvert pour un couvert homogène (LAI=5.0) et un coefficient d'atténuation $k=0.72$ (d'après Spitters et al., 1989).

2.2.5 Les modèles de réflectance

D'après ce qui vient d'être exposé, on conçoit que les relations entre les caractéristiques du couvert et les données radiométriques sont complexes. Plusieurs types de modèles ont été développés pour l'interprétation des données de télédétection dans les courtes longueurs d'ondes. Ils ont l'objectif de décrire les interactions entre le rayonnement et les éléments du couvert. Leur complexité est plus ou moins grande selon la façon de caractériser les propriétés des éléments du couvert (la structure et les propriétés optiques de la canopée et la surface du sol) et selon la façon de décrire les flux de rayonnement au sein du couvert. On les appelle aussi modèles de transfert radiatif (Baret et Podaire, 1988). Ces modèles font tous des hypothèses sur le couvert et des approximations sur la physique des échanges. On peut distinguer, en première approche, deux classes:

- 1) des modèles semi-empiriques,
- 2) des modèles plus complexes.

Les modèles semi-empiriques:

Ces modèles sont fondés sur une simplification du formalisme de la théorie de Kubelka-Munk (1931) de l'atténuation et de la diffusion du rayonnement dans des milieux gazeux homogènes qui aboutit (pour une longueur d'onde donnée) à l'expression:

$$\rho_c = \rho_\infty + (\rho_s - \rho_\infty) e^{-k \times LAI}$$

Eq. 2-8.

où ρ_c représente la réflectance bidirectionnelle du couvert mesurée à la verticale,
 ρ_∞ la réflectance asymptotique lorsque le LAI est infiniment grand,
 ρ_s la réflectance du sol, et
 k est un coefficient d'atténuation du rayonnement par le couvert (Figure 2-19);

toutes ces variables ayant des valeurs spectrales.

Goudriaan (1977) a fortement contribué à la modélisation du rayonnement dans le couvert à partir de ce principe et produit le modèle EXTRAD ("extinction of radiation"). Kumar (1988) a utilisé une version de l'Eq. 2-8. légèrement modifiée pour faire un ratio de deux bandes spectrales et relier ce ratio au rayonnement intercepté. Baret (1988) a étudié l'effet des propriétés optiques et l'angle d'inclinaison des feuilles et l'angle solaire sur l'Eq. 2-8 en utilisant un modèle plus complexe. Clevers (1986, 1989) est arrivé à une autre forme de l'Eq. 2-8 en partant d'une réflectance de couvert égale à la somme de la réflectance du sol et de celle de la végétation et en considérant que le taux de couverture de sol diminue exponentiellement en fonction du LAI. Il a nommé son équation combinée avec un indice de végétation le " modèle CLAIR " (Clevers, 1989).

Ces exemples ne sont pas exhaustifs, mais représentent des exemples de l'utilisation de ce principe. Les modèles semi-empiriques de réflectance souffrent de problèmes similaires à ceux des modèles de croissance semi-empiriques. Ils doivent être étalonnés pour chaque condition d'utilisation, ils ne prennent pas en compte les différents paramètres de la culture qui jouent sur la réflectance ni la

variabilité spatio-temporelle de ces paramètres. C'est pourquoi des modèles plus complexes sont intéressants.

Des modèles plus complexes:

Les modèles de ce type décrivent les flux d'énergie dans un couvert en prenant en compte un ensemble de caractéristiques d'architecture et de propriétés optiques des éléments de la canopée et du sol ainsi que des facteurs externes de la culture. Goel (1988), Myneni *et al.* (1989), et Sinoquet *et al.* (1995) ont dressé des inventaires de ces modèles. Goel distingue quatre classes de modèles qui se distinguent par la manière de décrire la structure du couvert:

- **Les modèles en milieu diffusant:** le couvert est représenté par une couche homogène, dense, et infinie composée d'éléments absorbants et diffusants de petite taille distribués aléatoirement. La structure du couvert est exprimée en termes de LAI et de distribution d'inclinaison des feuilles. Ces modèles sont basés sur la théorie de Kubelka-Munk (1931) ou sur l'équation du transfert radiatif de Chandrasekhar (1950). Les modèles de théorie de Kubelka-Munk décrivent la pénétration du rayonnement diffus et direct dans un milieu diffusant, par deux équations différentielles de premier ordre et avec deux paramètres (coefficient d'atténuation diffuse et coefficient de diffusion). L'atténuation des différents flux (ascendant et descendant) est traitée selon la loi de Beer-Lambert. Sur les principes du modèle K-M et de Duntley (1942), Allen *et al.* (1970) ajoutaient un troisième flux du rayonnement solaire direct descendant. Pour qu'un flux ascendant directionnel puisse être modélisé dans la direction d'un observateur, Suits (1972) inclue une quatrième équation différentielle qui décrit le flux sortant du milieu. Le modèle utilise quatre équations différentielles et neuf paramètres. Une hypothèse du modèle de Suits est que les éléments (i.e. feuilles) de la couche (i.e. canopée) sont orientés soit verticalement, soit horizontalement. Cette méthode simule un profil de réflectance d'une canopée non réaliste ayant la forme d'un "V" (Verhoef 1984). Verhoef (1984, 1985) a introduit le modèle SAIL qui calcule les neuf paramètres de Suits mais pour un LAI donné et avec une fonction de distribution des angles foliaires.

D'autres exemples de modèles de milieu diffusant sont ceux de Myneni *et al.* (1987) et de Verstraete *et al.* (1990). Tous ces modèles sont adaptés aux cultures intensives, homogènes, et bien développées, dans lesquelles les éléments de la végétation sont de taille faible par rapport à la hauteur des plantes.

- **Les modèles géométriques:** Le couvert végétal est décrit par une matrice de plantes isolées qui sont représentées par des formes géométriques simples (sphères, cônes, cylindres, ellipsoïdes, etc.). Les propriétés optiques, formes, et positionnements des plantes sont bien définis. La description des interactions du rayonnement par le couvert se fonde sur les lois de l'optique géométrique. L'ombrage est déterminé à partir de la forme et du positionnement des éléments de couvert. Ces modèles sont bien adaptés aux couverts épars (buissons, vergers, etc.) où la diffusion multiple peut-être négligée (Otterman, 1984; Goel et Grier, 1986a, 1987b). Une méthode considère que la réflectance est la somme des composants d'un couvert où la réflectance de la surface de chaque composant est additive et indépendante (i.e. Richardson *et al.*, 1975). L'autre méthode

considère que les réflectances des surfaces interagissent (i.e. Richardson et Wiegand, 1990; Goel et Grier, 1988)

- **Les modèles hybrides:** ils s'agit d'une élaboration des modèles géométriques où la diffusion multiple est prise en compte. Ils sont adaptés à des couverts hétérogènes et leur complexité est quelquefois très coûteuse en temps calcul (ex. Kimes et Kirchner, 1982; Bégué, 1991; modèle TRIM, Goel et Grier, 1988).
- **Les maquettes 3-D:** l'architecture des organes des plantes du couvert est décrite de façon explicite par des surfaces géométriques très précises. Elles représentent avec réalisme la forme botanique de la plante. Le transfert radiatif est analysé par des procédures statistiques utilisant la technique du lancer de rayons (Aries *et al.*, 1993) ou la méthode des radiosités (Andrieu *et al.*, 1995). Ces modèles simulent le régime lumineux réaliste à l'intérieur de la canopée mais ils sont très complexes, très coûteux en temps de calcul, et non inversibles.

2.2.6 Conclusions partielles: choix du modèle de transfert radiatif

Les caractéristiques des végétaux et des sols ont une variabilité spatiale et temporelle importante à l'échelle d'une région et d'un cycle de culture. L'assimilation des données radiométriques pour ré-étalonner les modèles de culture à ces échelles nécessite un modèle de transfert radiatif qui utilise non seulement la variable LAI qui assure l'interface avec le modèle de culture, mais qui prenne également en compte cette variabilité naturelle des autres paramètres du couvert. Les modèles géométriques et 3-D sont trop complexes d'utilisation et sont mal adaptés à une culture comme la betterave. Des différents modèles de transfert radiatif en milieu diffusant, nous avons retenu le modèle SAIL de Verhoef (1984, 1985).

Les neuf paramètres sont relativement peu nombreux. La structure de la canopée et les propriétés optiques des feuilles et du sol sont des paramètres d'entrée. Tous les paramètres ont un sens physique et sont mesurables au champ. SAIL a été modifié pour prendre en compte l'effet de "hot spot" (Baret, comm. pers.). Le paramètre LAI est le même que la variable d'état de SUCROS. Il est relativement simple, peu coûteux en temps de calcul, assez réaliste, et inversible. Ce modèle est probablement l'un des plus utilisés de ce type, on dispose déjà de bonnes études de sensibilité (cf. Chapitre 4 (ex. Simulation de la réflectance du couvert: Verhoef et Bunnik, 1981; Goel et Thompson, 1984a, b; Absorption du rayonnement dans le couvert: Baret et Olioso, 1989; Clevers et van Leeuwen, 1994a, b)). D'autres résultats montrent que SAIL calcule une réflectance bidirectionnelle conforme à celle mesurée (cf. Badwhar *et al.*, 1985; Goel, 1988). Ce modèle a été inversé sur les données multi-spectrales mesurées (Goel et Thompson, 1984a, b; Baret *et al.*, 1994). En couplant des modèles PROSPECT+SAIL, Jacquemoud (1992) a inversé les modèles sur des données à haute résolution spectrale et sur des données satellitaires simulées de Landsat TM et SPOT.

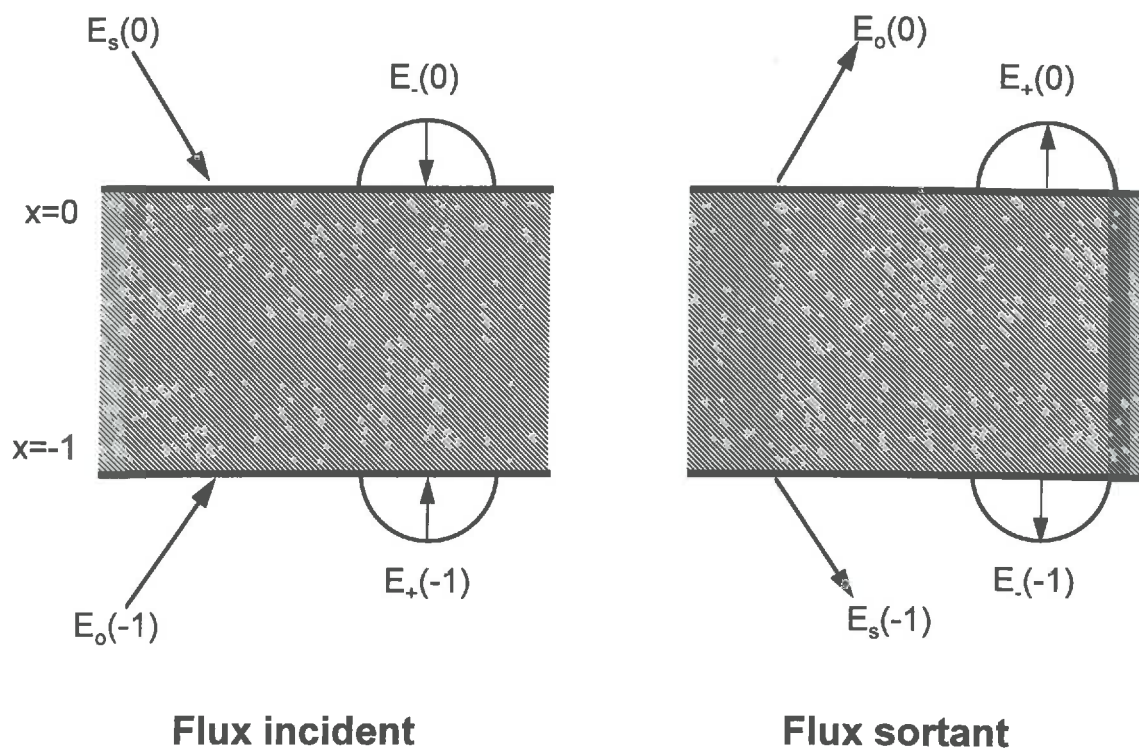


Figure 2-20. Les flux incident et sortant de SAIL dans une couche isolée (d'après Verhoef, 1985).

2.2.6.1 Description de SAIL

SAIL est décrit en détail par Verhoef (1984, 1985) et Baret et Podaire (1988). Les principes de base de SAIL sont brièvement présentés ici.

Les hypothèses de SAIL supposent un couvert homogène infiniment étendu, composé d'un seul type d'élément de surfaces relativement faibles (i.e. feuilles) et une distribution azimutale des feuilles aléatoire. Les feuilles sont lambertiennes, les propriétés spectrales identiques sur les deux faces, et les flux diffus descendants et montants sont isotropes. La réflectance du sol est considérée comme lambertienne si $\rho_{SBID}(\lambda) = \rho_{SHD}(\lambda) = \rho_{SBIH}(\lambda)$ [BiD=bidirectionnelle, HD=hémisphérique directionnelle, BiH=bidirectionnelle hémisphérique].

Le modèle décrit les flux (direct et diffus) ascendant et descendant dans une couche homogène. Les flux sont décrits par les quatre équations de Suits, avec neuf paramètres. Les paramètres sont des coefficients d'extinction et de diffusion. Suivant la notation de Bunnik (1978) et Verhoef (1984) les quatre équations sont:

$$\frac{dE_s}{dx} = kE_s, \quad \text{Eq. 2-9.}$$

$$\frac{dE_-}{dx} = -sE_s + aE_- - \sigma E_+, \quad \text{Eq. 2-10.}$$

$$\frac{dE_+}{dx} = s'E_s + \sigma E_- - aE_+, \quad \text{Eq. 2-11.}$$

$$\frac{dE_o}{dx} = wE_s + vE_- + uE_+ - KE_o \quad \text{Eq. 2-12.}$$

(Verhoef, 1984)

où, E_s est le flux solaire direct et E_- et E_+ sont respectivement les flux diffus descendant et ascendant. E_o est le flux directionnel dans la direction d'observation. L'épaisseur du couvert est définie par x et est déterminée à partir du LAI. La distribution azimutale des feuilles est supposée aléatoire. La distribution zénithale est décrite par une fonction de distribution sphérique, d'angle moyen a/a . Les neuf paramètres de ces quatre équations (k , K , s , s' , a , σ , u , v , et w) sont définis à partir de la réflectance, la transmittance des feuilles, du LAI et de l'angle foliarie moyen, a/a . La Figure 2-20 montre les flux d'une couche dans le couvert. Le transfert de chaque flux dans la couche est modéré par leurs propres coefficients d'extinction et de diffusion qui dérivent des neuf paramètres. Le flux $E_o(0)$ est la réflectance directionnelle dans la direction de l'observateur.

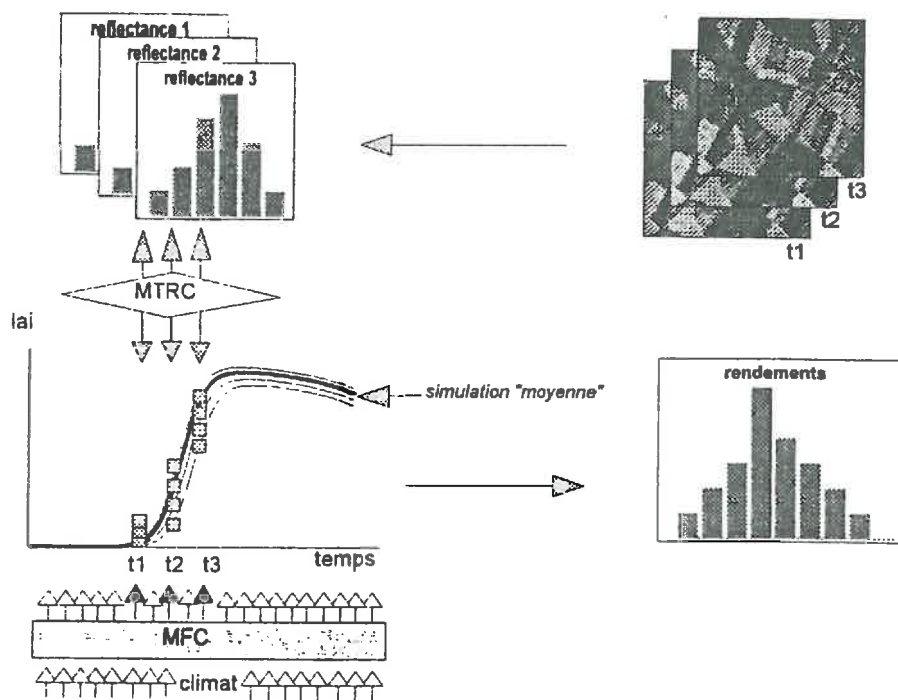


Figure 2-21. Assimilation de données de télédétection dans le modèle de culture (Guérif *et al.*, 1997).

2.3 Assimilation des données de télédétection dans les modèles de fonctionnement de culture

2.3.1 Principe

Il a été montré dans les paragraphes précédents comment :

- 1) les modèles de fonctionnement des cultures ne peuvent pas être facilement utilisés à l'échelle régionale, à cause en particulier de la difficulté de renseigner, à cette échelle, certains de leurs paramètres;
- 2) les mesures de télédétection dans le domaine optique permettent, moyennant leurs modèles d'interprétation-modèles de transfert radiatif dans le couvert, d'accéder à des variables biophysiques caractéristiques de l'état du couvert, telles le LAI, qui sont des variables d'entrée ou d'état des modèles de culture. Cet accès est possible de façon répétée dans le temps et sur de grands domaines d'espace, avec des résolutions spatiales compatibles avec la taille du parcellaire agricole .

Il est alors possible d'utiliser ces informations obtenues par télédétection dans *des procédures de contrôle* des modèles de fonctionnement des cultures, qui supposent un couplage entre modèle de culture et modèle de transfert radiatif dans le couvert.

On appelle assimilation de la donnée de télédétection dans le modèle de culture le procédé qui consiste :

- 1) à considérer cette donnée ponctuelle comme la traduction d'un état "vrai" du couvert; et
- 2) à contraindre le modèle de culture à prendre cet état "vrai" en considération. (Guéris *et al.*, 1995). (cf Figure 2-21).

Le LAI est la variable déduite de la télédétection dans le domaine optique qui est la plus généralement utilisée dans ces procédures de couplage entre modèle de culture et modèle de transfert radiatif dans le couvert. Un grand nombre d'auteurs ont cependant montré la capacité d'accéder dans ce même domaine de longueur d'onde à d'autres variables comme l'efficacité d'absorption du PAR (Asrar *et al.*, 1985; Baret et Olioso, 1989, Leblon *et al.*, 1991), le taux de couverture du sol (Bouman *et al.*, 1993),... Ces variables sont également utilisables dans le couplage si le modèle de fonctionnement les simule.

À la différence des premières approches empiriques qui tentaient d'utiliser la télédétection pour estimer la production des cultures à partir de quelques données instantanées arbitrairement réparties au cours du cycle, on a ici l'association d'un modèle dynamique qui décrit le processus d'élaboration du rendement et de données instantanées qui permettent son contrôle et fournissent des sorties spatialisées du modèle.

2.3.2 Méthodes

Il existe plusieurs façons d'exercer le contrôle du modèle de fonctionnement par les variables mesurées par télédétection. Delécolle *et al.* (1992), Fischer *et al.* (1994), Moulin (1995), et Guéris *et al.* (1996), ont passé en revue diverses méthodes. Des premiers travaux ont utilisé une méthode de forçage du modèle; ensuite, des méthodes de ré-étalonnage ou de correction ont été appliquées par différents auteurs. Guéris et Delécolle (1993) ont donné des exemples de ces deux méthodes.

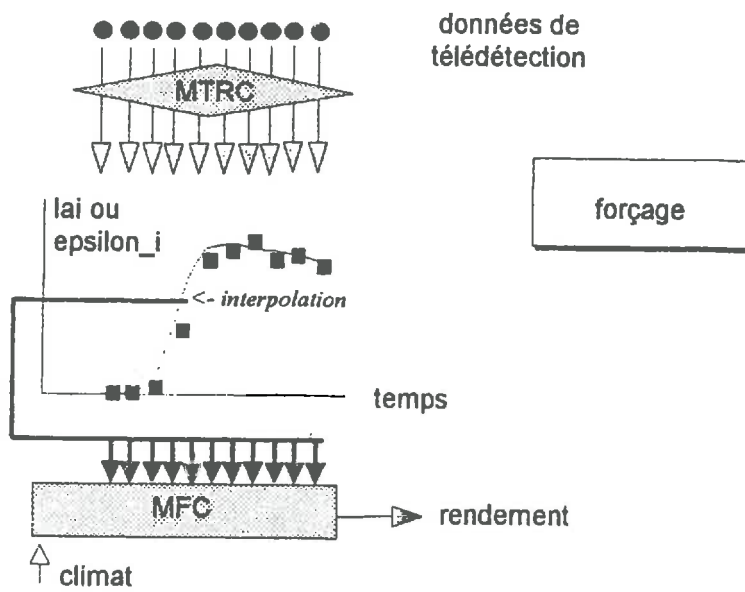


Figure 2-22. Forçage d'un modèle de culture par des estimations de l'efficacité d'interception du rayonnement (Guérif et al., 1997).

2.3.2.1 Correction par Forçage

Cette méthode consiste à utiliser les variables biophysiques comme des variables d'entrée du modèle de fonctionnement: les réflectances dans le domaine optique, dans notre cas, fournissent, avec une fréquence compatible avec le pas de temps du modèle, une estimation de l'efficacité d'interception du rayonnement par le couvert (cf Figure 2-22). Dans ce cas, la donnée de télédétection se substitue à une modélisation de la variable de structure.

Cette approche est bien adaptée aux modèles de fonctionnement très simples qui ne génèrent pas eux-mêmes la variable de structure et sont généralement couplés à des modèles de transfert radiatif de type semi-empiriques. Elle a été réalisée par divers auteurs avec des modèles d'efficacité semi-empirique comme celui de Monteith (cf 1.1.2.2.). La variable biophysique estimée à partir des données de télédétection est généralement l'efficacité d'absorption du PAR (ϵ_i), la plupart du temps calculée à partir d'indices de végétation. Kumar et Monteith (1981), ont utilisé le rapport des réflectances proche infrarouge/PAR pour estimer ϵ_i dans le cas de la betterave à sucre. L'accumulation de matière sèche aérienne a ensuite été simulée par le forçage du modèle par l' ϵ_i mesurée. Jaggard et Clark (1990) ont utilisé le même principe, mais ils ont simulé le rendement en sucre de betteraves à l'échelle régionale. En utilisant des données SPOT, Guérif *et al.* (1988), utilisent l'indice NDVI pour estimer le ϵ_i puis, par forçage du modèle, calculent la production de matière sèche et le rendement de cultures de blé dur. Leblon *et al.* (1991) ont amélioré la méthode d'estimation de ϵ_i en inversant un modèle semi-empirique de réflectance (cf 1.2.4) pour obtenir le LAI qui est ensuite utilisé dans un modèle simplifié d'absorption du PAR (Baret et Olioso, 1989).

D'autres variables biophysiques peuvent également être estimées à partir d'autres longueurs d'onde, par exemple la masse d'eau dans le couvert calculé à partir de données micro-ondes pourrait être utilisée (Bouman et Goudriaan, 1990). Guérif et Delécolle (1993) utilisent conjointement un ϵ_i estimé à partir de NDVI et un indice de stress hydrique estimé à partir de la température de surface (calculée à partir des canaux thermiques de NOAA-AVHRR) pour forcer un modèle de production en efficacités où ϵ_b est réduit par un facteur de stress et estiment ainsi la production de biomasse de céréales en conditions semi-arides.

Cette approche par forçage est également envisageable avec des modèles plus complexes où l'on supprime la relation fonctionnelle entre production de biomasse et mise à jour de la structure. Ainsi, Delécolle et Guérif (1988) ont remplacé le calcul du LAI dans le modèle blé AFRCWHEAT (Weir *et al.*, 1984) par une description externe de l'évolution du LAI au cours du temps obtenue par inversion d'une série de données SPOT.

Dans tous les cas, cette stratégie de forçage d'un modèle exige une bonne description de l'évolution temporelle des variables d'entrée et requiert donc l'acquisition de nombreuses données satellitaires, bien réparties tout au long du cycle de la culture, ce qui est difficilement réalisable dans les climats tempérés (Kanemasu *et al.*, 1985) et renvoie à l'utilisation des satellites à basse résolution. La spatialisation des sorties du modèle est assurée par la spatialisation des données d'entrée.

2.3.2.2 Remise à jour

Une variante du forçage, consiste à n'utiliser la variable d'état obtenue par télédétection que les jours où elle est disponible, sans chercher à l'interpoler entre les différentes dates d'acquisition de données. Sans supprimer la relation fonctionnelle entre production de biomasse et mise à jour de la structure (LAI ou ϵ_i), on laisse le modèle simuler l'évolution de la structure entre deux dates d'acquisition. Maas *et al.* (1985) a corrigé un modèle de maïs, GRAMI, en remettant à jour, à chaque date où des données de télédétection étaient disponibles (radiomètres de terrain), les variables d'état simulées par le modèle (LAI et température de surface).

Comme pour le forçage, cette stratégie donne des résultats d'autant meilleurs que le nombre de données disponibles est grand. Elle est toutefois peut satisfaisante car elle ne propose pas de corriger ce qui dans le paramétrage du modèle ou son initialisation provoque les écarts entre les simulations du modèle et les états observés par télédétection. C'est ce qui va être fait dans le type de méthode suivant.

2.3.2.3 Correction par ré-initialisation ou ré-étalonnage

Elle s'adresse à des modèles de fonctionnement plus complets, autonomes, qui en particulier, possèdent leur propre logique de mise en place de la structure du couvert. En revanche, leur mise en œuvre pose le problème de la connaissance de certains de leurs paramètres (ceux liés au génotype par exemple) et des conditions d'initialisation (date de semis, densité...), qui sont très dépendants de la situation culturale. Les variables biophysiques estimées par télédétection et disponibles à quelques dates, permettent, par confrontation avec les valeurs simulées par le modèle de culture, de ré-estimer ces paramètres et/ou conditions initiales (par minimisation d'une critère d'erreur); l'ensemble des autres paramètres, considérés comme plus "robustes", est laissé à ses valeurs par défaut. La ré-initialisation consiste à retrouver les variables d'entrées qui sont nécessaires pour démarrer le modèle, comme la date de semis. Le ré-étalonnage consiste à corriger la valeur d'un ou plusieurs paramètres. Les nouvelles valeurs des paramètres, trouvées par inversion du modèle, *améliore* les résultats du modèle.

Ce type de méthode a été appliqué avec des données d'origine autres que la télédétection. On peut citer Swaney *et al.* (1986) qui ont utilisé des prélèvements destructifs, pour ré-estimer un paramètre de facteur limitant de la photosynthèse et un paramètre de date du stade de reproduction dans le modèle SOYGRO (Wilkerson *et al.*, 1983). Ils ont trouvé que quatre dates de mesure suffisent pour améliorer la prévision des rendements du soja.

Dans le cas de l'utilisation de données de télédétection, un modèle de transfert radiatif dans le couvert doit être couplé au modèle de culture pour assurer le passage de la variable de structure du couvert (variable télédétectée). Deux stratégies ont été mises en œuvre, selon que le modèle de transfert radiatif dans le couvert est utilisé dans le sens "inverse" ou "direct".

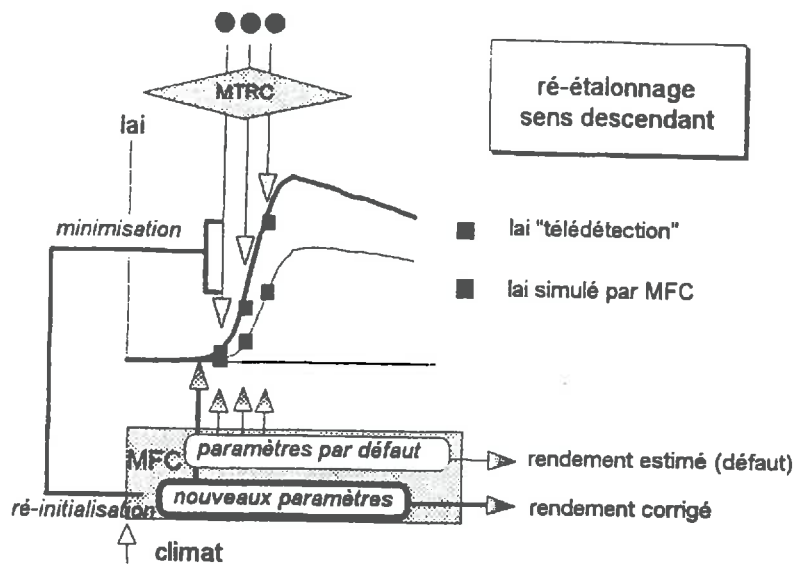


Figure 2-23. Correction d'une modèle par ré-étalonnage, démarche descendante (Guérif *et al.*, 1997).

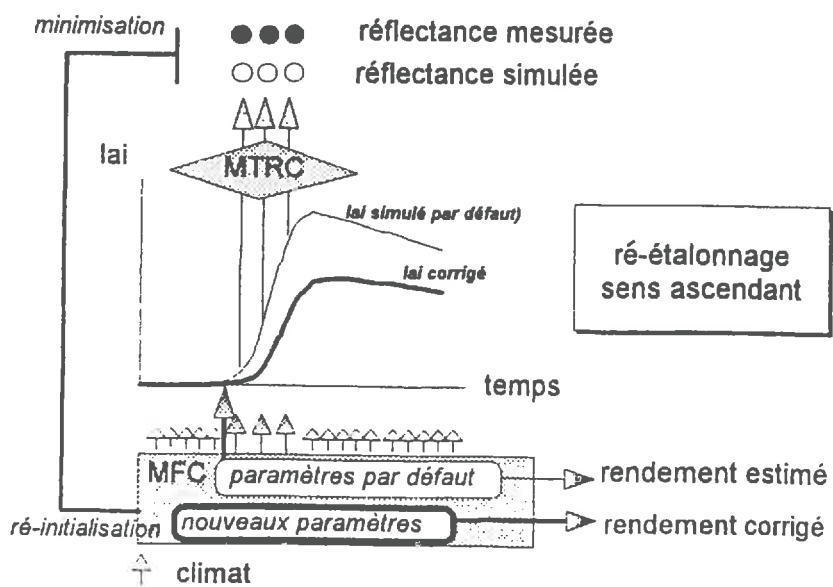


Figure 2-24. Correction d'une modèle par ré-étalonnage, sens direct (Guérif *et al.*, 1997).

Stratégie du sens inverse (démarche descendante):

La minimisation porte sur les variables biophysiques caractéristiques du couvert comme le LAI (Figure 2-23). Elles sont calculées par inversion d'un modèle de réflectance. Ici le modèle de réflectance est utilisé dans un sens "inverse", soit par l'inversion analytique d'une fonction semi-empirique (i.e. $\rho=f(\text{LAI})$).

La stratégie est bien adaptée pour les modèles de réflectance semi-empiriques avec des indices de végétation, mais les modèles plus complexes ne sont pas exclus. Les modèles plus complexes, comme le type de transfert radiatif, qui prend en compte la structure et les propriétés optiques du couvert et sol, sont intéressants pour bien calculer la réflectance bidirectionnelle. Mais, les modèles de réflectance plus complexes doivent être inversés par des méthodes numériques par un algorithme de minimisation pour retrouver la variable d'état (ex. Baret *et al.*, 1994). L'inversion est coûteuse en temps informatique, les solutions ne sont pas toujours stables, et les paramètres ajustés peuvent être nombreux. Aussi, faut-il plusieurs mesures acquises pour des configurations et longueurs d'ondes différentes pour bien définir la réflectance bidirectionnelle du couvert. Ces données ne sont pas toujours disponibles, surtout avec des données aéroportées ou satellitaires. Donc, l'application de l'inversion nécessite un compromis entre un modèle semi-empirique et des modèles plus complexes. Les modèles de type géométriques ne sont pas utilisables par cette stratégie.

Maas (1988a, b) a élaboré cette stratégie avec un modèle GRAMI pour le maïs et les données optiques et thermiques de Landsat TM. Le LAI, ainsi qu'un indice de stress hydrique "observés" ont été obtenus par inversion de modèles semi-empiriques à partir d'indice de végétation et de la température de surface mesurés par télédétection. Le modèle GRAMI a été ensuite inversé pour ajuster des paramètres de LAI initial et de taux de croissance du LAI sur ces valeurs "observées". Les corrections du GRAMI avec les différents nombres de dates. Avec 4 à 7 dates, Maas, dans Guéris et Décolle (1993), a montré que la croissance de LAI d'une culture peut-être bien restituée, mais moins d'observations a donné une simulation de la croissance moins précise.

Van Leeuwen et Clevers (1994) ont montré l'intérêt d'utiliser des données optiques et radar pour ré-étalonner le modèle SUCROS appliqué à des cultures de betterave. Ils ont utilisé pour cela les modèles CLAIR (optique; Clevers, 1988, 1989) et CLOUD (micro-onde; Attema et Ulaby, 1978) dans le sens inverse.

Stratégie du sens direct:

La minimisation porte sur les écarts entre les réflectances simulées et observées (Figure 2-24). Dans ce cas, le modèle de réflectance doit alors être couplé au modèle de croissance et le modèle couplé résultant permet de simuler l'évolution de la réflectance de la culture. Ici, le modèle de croissance alimente la variable d'état (ex. LAI) à partir de laquelle le modèle de réflectance simule la réflectance. Les paramètres du modèle de croissance sont ajustés par la minimisation du critère d'erreur sur la réflectance simulée. On suppose là, et on vérifie (Moulin, 1995), comme dans les méthodes précédentes, que le ré-étalonnage ou la ré-initialisation du modèle de culture permet d'obtenir une meilleure simulation non seulement de l'évolution de la réflectance mais aussi des autres variables biologiques d'intérêt dans les applications visées (rendement en particulier).

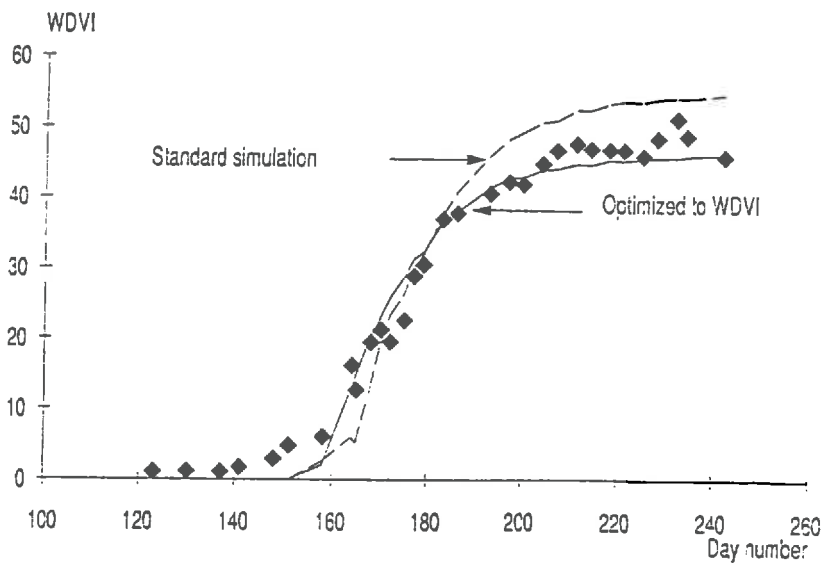
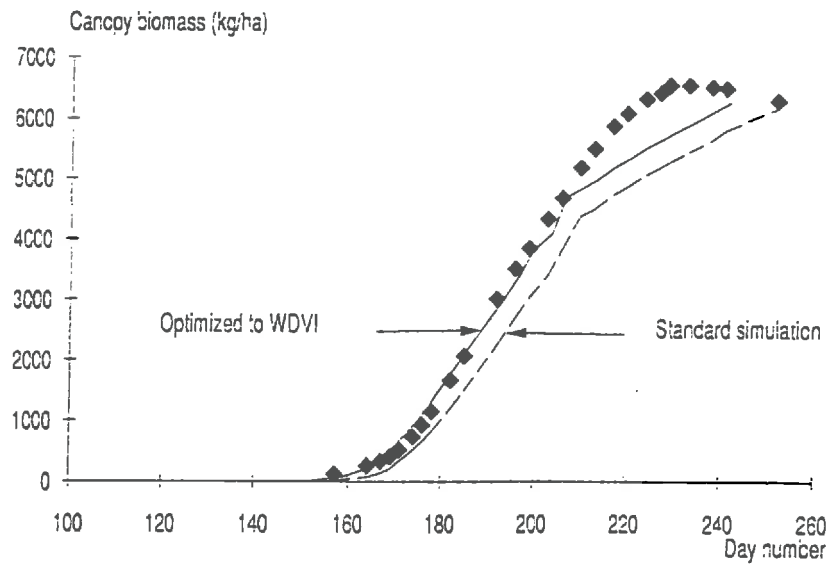


Figure 2-25. Biomasse aérienne de la culture de betterave et indice WdVI estimés en fin du processus de ré-étalonnage comparés aux simulations standard (avant ré-étalonnage) et aux mesures (Bouman, 1991).

Cette stratégie a été mise en oeuvre à la fois par Maas *et al.* (1991) et par Bouman (1991), Moulin *et al.* (1995), et Moulin (1995). Bouman (1991) a montré l'intérêt de l'utilisation à la fois des données optiques et radar. Il a utilisé le modèle SUCROS pour la betterave, couplé avec le modèle EXTRAD (Goudriaan, 1977) pour l'optique et CLOUD (Attema et Ulaby, 1978) pour le radar. Le ré-étalonnage était réalisé par la confrontation des indices de végétation et des signaux radar rétro-diffusés simulés par SUCROS+EXTRAD+CLOUD. Le choix des paramètres à ré-étalonner était fait après une analyse de la sensibilité de SUCROS et de la précision d'estimation des variables d'état par la télédétection. Avec les données radar (36 dates) sur une parcelle en 1980, la date de semis et le taux relatif de croissance des feuilles (RGRL) sont ajustés. Avec les données optiques (34 dates), la date de semis, le RGRL, l'efficacité initiale de l'utilisation du rayonnement (EFF), et un LAI maximum au-dessus duquel il y a la sénescence causée par l'ombrage mutuel. Il a évalué la qualité de la correction en mesurant la différence de biomasse aérienne mesurée et simulée moyenne pendant la saison (Figure 2-25). Les modèles couplés avec des paramètres par défaut avaient une erreur d'estimation de biomasse aérienne pendant la saison de 680kg/ha. Corrigée avec des données radar, l'erreur a diminué à 450kg/ha et à 310kg/ha pour les données optiques. En utilisant les deux sources de données, l'erreur a diminué à 260kg/ha. Il a noté que l'ajustement conjoint des paramètres fait que l'évolution du LAI est bien simulée, mais les valeurs des paramètres ajustés peuvent différer des vraies conditions au champ. Il a suggéré l'utilisation des bornes de paramètres dans les gammes biologiquement plausibles (Bouman, 1991).

Moulin (1995) a couplé le modèle AFRCWHEAT2 (Porter, 1993) avec le modèle SAIL. A cause du faible nombre d'images SPOT disponibles (quatre, dont trois dates très proches), Moulin a choisi de simplement ré-initialiser AFRCWHEAT2 avec la date de semis. La ré-initialisation du modèle sur une parcelle a permis une meilleure simulation de la réflectance, une réduction de l'erreur d'estimation de la production primaire nette de 17.6% à 2.8%, et une réduction de l'erreur d'estimation du rendement de 13.6% à 2.4%. L'initialisation a permis de retrouver la date de semis réelle avec une erreur de 3 jours. (Moulin, 1995; Moulin *et al.*, 1995a).

L'utilisation des modèles complexes dans le sens direct est avantageuse. Cette démarche est moins coûteuse en temps informatique que le sens inverse, les données d'entrée sont moins importantes, et le problème de l'instabilité d'inversion est supprimé. En tout cas, la stratégie de ré-étalonnage (et peut-être la stratégie de forçage, selon la variable ré-établie) nécessite la minimisation du modèle de croissance sur la variable du couvert observée.

2.3.3 Méthodes d'inversion

On appelle inversion d'un modèle à partir de mesures des variables d'état, le processus qui consiste à estimer des valeurs des paramètres qui permettent de reproduire de façon la plus fidèle possible les mesures.

Lorsque la complexité mathématique des modèles est grande, comme c'est le cas des modèles de culture et des modèles de réflectance, on a recours à des méthodes d'inversion numérique qui sont

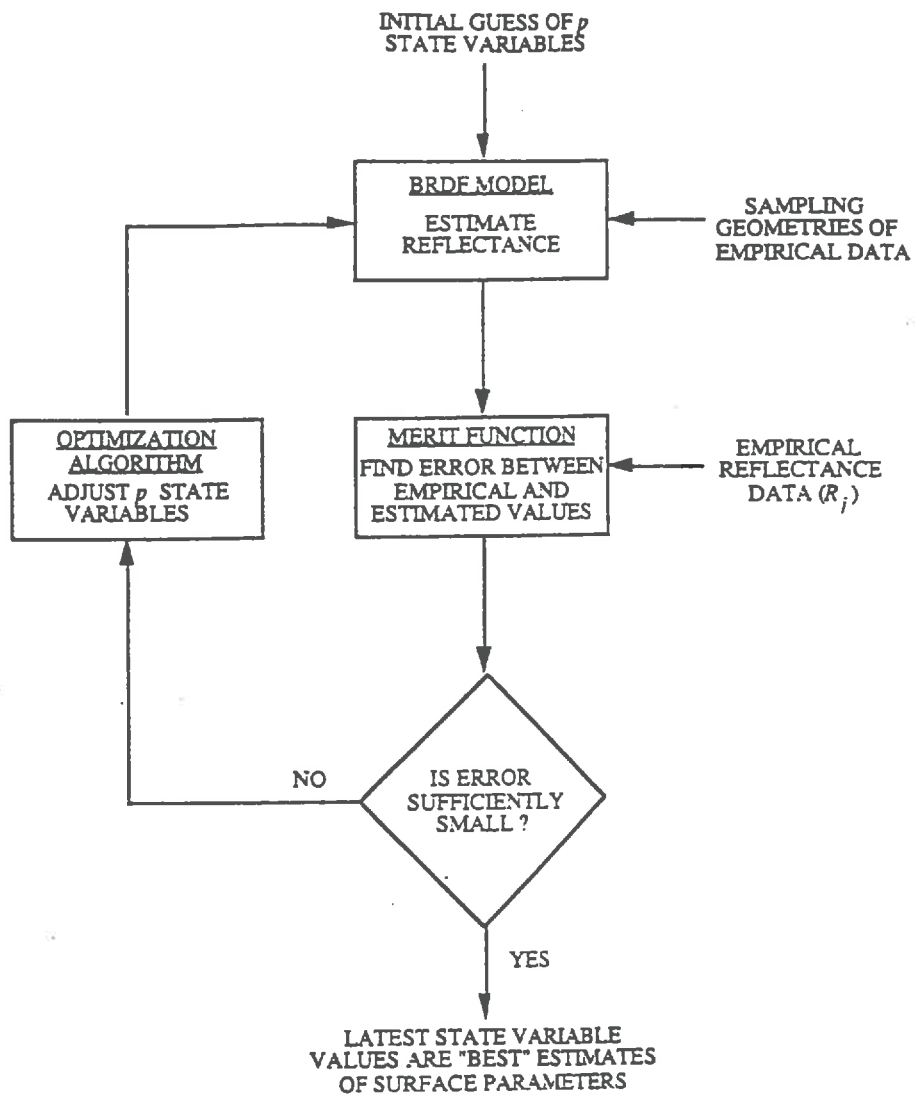


Figure 2-26. Organigramme de résolution du problème d'inversion. Cas d'un modèle de réflectance (Privette, 1994).

des méthodes d'optimisation (Renders et Flasse, 1996). Ces méthodes ont toutes pour objectif de minimiser un critère d'erreur (ou "fonction de coût", "critère de mérite") qui est un critère calculé à partir de l'écart entre les données mesurés et simulées (cf. Figure 2-26).

Si on représente par Y la sortie du modèle, par X les variables indépendantes, et par θ^* les caractéristiques ou paramètres vrais du système (X et θ sont des vecteurs) on a:

$$Y = Y(X; \theta^*)$$

Eq. 2-13.

Soit Y_k une mesure de Y :

$$Y = Y(X; \theta^*) + \varepsilon_k$$

Eq. 2-14.

le critère à minimiser $d(\theta)$ est un critère des moindres carrés du type :

$$d(\theta) = \sum_{k=1}^n w_k [Y_k - Y(X_k; \theta)]^2$$

Eq. 2-15.

où n est le nombre de mesures, θ_k les caractéristiques du système pour la $k^{\text{ième}}$ mesure. Les w_k sont des poids donnés aux différentes mesures. Si p est le nombre de paramètres à estimer, les solutions $\theta \in \mathbb{R}^p$; $p+1$ mesures au moins sont nécessaires.

Il existe différentes stratégies de recherche selon la manière d'exploiter la critère à minimiser:

1. La recherche est faite autour d'un point dans l'espace possible et exploite l'information locale (en particulier le gradient ou dérivée de la fonction par rapport aux paramètres) pour trouver un meilleur point (i.e. Quasi-Newton, Marquardt);
2. La recherche est faite dans un espace "géométrique" constitué par une famille de points (i.e. Simplex, Nelder and Mead, 1965; Price, 1979) et exploite l'ordre relatif des différentes solutions possibles pour orienter la recherche ultérieure dans la meilleure direction.

Ces deux stratégies utilisent seulement l'information locale pour trouver une meilleure solution. Elles convergent vers un point stationnaire mais ne garantissent pas l'atteinte d'un minimum global (\neq minimum local).

3. La troisième catégorie de stratégies utilise une population de solutions possibles distribuée aléatoirement sur l'ensemble de l'espace de la fonction et converge à chaque itération autour d'un sous-espace de l'espace précédent (i.e. Price, Genetic Algorithms méthodes). Ce type d'algorithme a peu de risque de tomber dans un minimum local, mais est il est très coûteux en temps informatique et en mémoire.

Récemment, plusieurs auteurs ont comparé les caractéristiques des différents algorithmes pour l'inversion de modèles de réflectance: parmi eux, Renders et Flasse (1996) sur le modèle de Verstraete *et al.* (1990), Jacquemoud *et al.* (1994) sur les modèles SAIL+PROSPECT, Privette *et al.* (1994) sur le modèle CANTEQ. Les principaux critères d'évaluation des méthodes sont:

- convergence: en théorie elle est définie par l'existence d'un nombre fini d'itérations; dans la pratique, elle est évaluée soit par l'amplitude de variation du critère d'erreur entre les dernières itérations, soit par l'amplitude de variation des paramètres par rapport à la précision de définition de la surface. Dans tous les cas, c'est une question délicate, et la certitude d'arrêt du processus autour d'un point stationnaire n'est pas garantie,
- la robustesse: capacité de trouver un minimum global et d'éviter les minima locaux,
- la précision: distance multidimensionnelle D entre solution et minimum global:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^p \frac{(\theta_i - \theta_i^*)^2}{w_i}}$$

Eq. 2-16.

- le temps de calcul: l'essentiel du temps de calcul est consacré à l'évaluation du critère à minimiser: il dépend donc directement du nombre de mesures et bien sûr du nombre d'itérations.

Renders et Flasse (1996) a comparé trois algorithmes: Quasi-Newton (QN), Simplex (SP), Genetic Algorithms (GA). Jacquemoud *et al.* (1994) ont comparé quatre algorithmes d'inversion (QN, Marquardt=MQ, SP, GA), Privette *et al.* (1994) en ont testé trois (SP, QN, et une méthode hybride entre les deux). Les tests sont généralement faits avec un jeu de données qui a été bruité de manière à permettre un grand nombre de processus d'inversion. Il ressort de ces études que les méthodes SP et QN ont plus de difficultés à trouver le minimum global. Toutefois, le SP atteint de meilleurs résultats que QN quand le nombre de mesures est faible. Quelle que soit la méthode, la précision augmente avec le nombre de mesures. Quant aux temps de calcul, ils sont directement liés à la stratégie d'utilisation de l'information au cours de la recherche: le QN et SP qui n'utilisent que l'information locale sont beaucoup plus rapides que le GA qui utilise les relations entre tous les points de la population. En bilan les méthodes GA sont très coûteuses en temps de calcul et ont une précision limitée mais elles sont très robustes. Le QN est précis et converge rapidement quand il ne tombe pas dans des minima locaux. La méthode du SIMPLEX a de bonnes caractéristiques intermédiaires: assez bonne robustesse, précision, rapidité.

À l'issue de cette étude bibliographique, nous pouvons répreciser les éléments de la démarche adoptée dans la suite du travail:

- 1) Nous nous sommes dotés des deux outils nécessaires: un modèle de simulation de la culture de la betterave sucrière, SUCROS, et un modèle de transfert radiatif dans le couvert pour les courtes longueurs d'ondes: SAIL. Le couplage de ces deux modèles via la variable LAI permettra, moyennant des jeux de paramètres pour SUCROS et SAIL, de simuler des réflectances à partir de caractéristiques de situations culturales particulières. C'est l'inversion de ce modèle couplé à partir de réflectances mesurées, autrement appelée assimilation de données de réflectances, qui permettra de retrouver certains paramètres jugés les plus déterminants du modèle de croissance.
 - 2) Les paramètres du modèle de croissance auxquels nous nous intéressons prioritairement sont ceux de la phase d'implantation. Nous avons vu dans cette étude bibliographique le rôle important qu'ils jouent, qu'ils sont hautement variables, et dont le modèle ne peut, dans sa forme actuelle, décrire le déterminisme. Notre objectif est de retrouver, par inversion du modèle couplé sur des données de réflectance mesurées, des valeurs correctes de ces paramètres, qui permettent d'assurer une bonne description de la croissance de la culture et du rendement final. Bien que comportant une phase de mise au point et d'évaluation à l'échelle très locale, rappelons que cette étude vise une application sur une échelle plus globale et que cette spécificité sera largement prise en compte.
- Les différentes étapes du travail vont être présentées dans la suite. Nous présenterons, au Chapitre 3, les acquisitions de données expérimentales que nous avons faites pour l'évaluation et l'étalonnage des deux modèles dans nos conditions de culture, ainsi que pour le test de la méthode de correction par assimilation.
 - Nous présenterons ensuite, au Chapitre 4, l'évaluation et l'étalonnage des modèles, avec une part importante consacrée à SUCROS.
 - Nous avons vu que, outre le LAI, un certain nombre d'autres caractéristiques de la culture, telles que les angles foliaires ou les propriétés optiques des feuilles, qui ne sont pas des variables de sortie de SUCROS, ainsi que des caractéristiques du sol interviennent dans le modèle SAIL. Leur estimation, particulièrement sur de grands domaines d'espace, n'est pas évidente: nous analyserons au Chapitre 5 les effets des erreurs d'estimation de ces paramètres sur les estimations de réflectance.
 - Enfin, nous verrons, au Chapitre 6, à travers des simulations de configurations réalistes d'assimilation de données de réflectance, comment ces erreurs sur les réflectances, combinées avec des dates d'acquisition des données de réflectances et des situations culturales, se répercutent sur les performances de la méthode d'assimilation des données de réflectance.

Acquisition des données expérimentales

3. Acquisition des données expérimentales

On a acquis des jeux de données pour satisfaire trois types d'objectifs:

1. L'étalonnage de SUCROS et de SAIL: on a besoin pour cet étalonnage d'un jeu de données qui caractérise à la fois les différentes fonctions de la croissance et les relations entre états de croissance et réflectance. Certains paramètres des modèles sont mesurables directement, d'autres doivent être déterminés par ajustement des simulations faites pour certaines variables avec des mesures réalisées sur ces mêmes variables.
2. Ensuite, on a voulu se doter d'un jeu de données permettant l'évaluation des modèles et de l'ensemble de la méthode. Ce jeu de données doit bien sûr être indépendant du jeu de données d'étalonnage.
3. Enfin, étant donné que les modèles seront utilisés sur une grande échelle, il est important d'avoir une idée de la variabilité de leurs paramètres à cette échelle pour avoir une idée de l'ordre de grandeur des effets induits sur les simulations. Nous avons réalisé une caractérisation sommaire de cette variabilité dans le cas des paramètres du modèle SAIL.

Nous présenterons les données acquises pour ces trois objectifs.

3.1 Les données d'étalonnage des modèles

3.1.1 Le dispositif expérimental

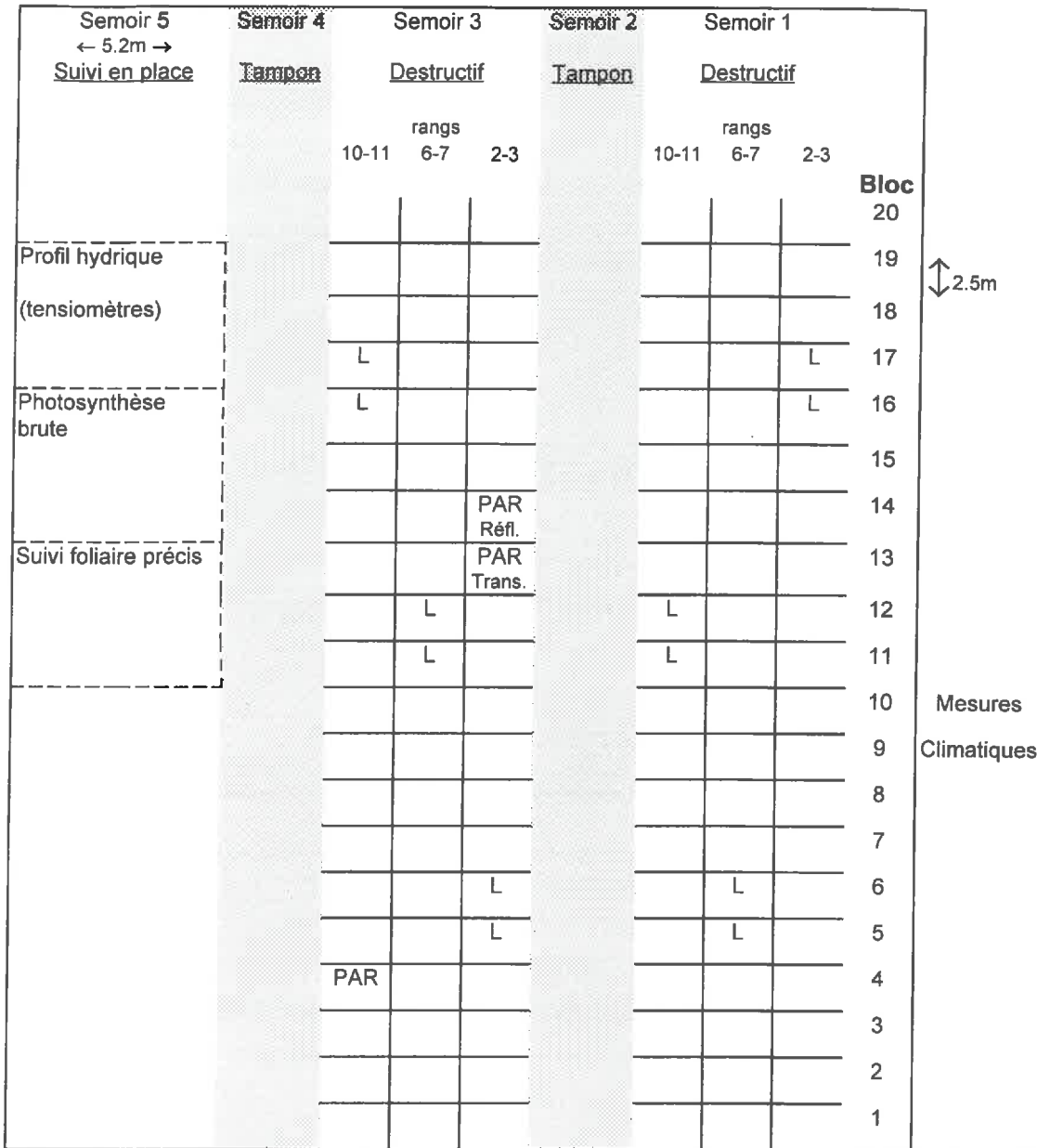
Une expérimentation a été mise en oeuvre pendant la saison de 1994 pour acquérir un jeu de données complet pour l'étalonnage de SUCROS et de SAIL. Dans la suite on l'appellera, par commodité, culture d'étalonnage. Une culture de betterave en conditions de croissance optimale a été réalisée sur le domaine expérimental de l'INRA à Mons-en-Chaussée dans l'est du département de La Somme. La station est située dans la région du Santerre où la betterave représente une surface importante et atteint de bons rendements.

La parcelle et l'itinéraire technique:

Une parcelle de 0.64ha, semée en blé l'année précédente, était réservée pour l'expérimentation. La texture du sol est un limon moyen.

Après la récolte du blé (août 1993), la parcelle a été labourée, et fertilisée avec 100 kg/ha d'acide phosphorique, 300 kg/ha de potasse, et 40 kg/ha de MgO. Cent soixante unités d'azote ha⁻¹ ont été appliquées le 15 février 1994. La préparation du lit de semence (2 passages de Précilitor) et le semis (semoir de précision 12 rangs) ont été réalisés le 18 avril. La profondeur de semis réalisée a été de 2.5 cm. La densité de plantes visée était une densité couramment pratiquée de 110 000 pieds-ha⁻¹. Pour cela, la densité de semis est a été fixée à 148 000 semences-ha⁻¹ (espacement entre lignes de 45cm, sur la ligne de 15cm), ce qui correspond à un taux de levée moyen attendu de l'ordre de 75%.

Le choix de la variété, LASER, a été fait pour être le mieux possible représentatif des variétés couramment semées par les agriculteurs, sans qu'il soit possible d'assurer qu'on y soit parvenu. La



note: L = Blocs du suivi de la levée
 PAR = Blocs réservés aux mesures de bilan radiatif

Figure 3-1. Plan du dispositif expérimental, Mons-en-Chaussée, 1994.

variabilité génétique est assez importante dans le cas de la betterave et se traduit par une variabilité des traits morphologiques. Il n'est cependant pas possible d'identifier des groupes variétaux dont les caractéristiques ou exigences écophysologiques soient nettement identifiées comme dans le cas du blé ou du maïs.

Disposition des mesures:

La parcelle expérimentale représentait cinq largeurs de semoirs parmi lesquelles trois ont été utilisées pour les mesures, et deux constituaient des zones tampon (Figure 3-1). En effet, de façon à maintenir une croissance en conditions optimales et rester dans les hypothèses de SUCROS, ces zones tampon étaient réservées pour les passages des équipements d'irrigation et de traitements phytosanitaires. Des tensiomètres à mercure (jusqu'à 1.9m de profondeur) étaient installés pour suivre l'état hydrique du sol et piloter les irrigations.

Des trois zones réservées aux mesures, deux ont été utilisées pour les mesures destructives de croissance et les mesures de télédétection associées. La troisième a été utilisée pour réaliser des suivis en place (mesures d'humidité du sol et suivi foliaire précis) et des mesures ponctuelles (photosynthèse brute).

Pour limiter au maximum la variabilité des mesures, elles n'ont été faites que sur les rangs dont le sol n'avait pas été tassé par les roues du tracteur (rangs 2-3, 6-7, et 10-11 du semoir).

Dans les deux zones réservées, les mesures destructives de croissance et les mesures de télédétection associées, ont été faites sur des placettes situées dans des blocs répartis aléatoirement dans la parcelle. Un bloc était constitué de deux rangs du semis sur 2.5 m de longueur. Dans chaque bloc, une placette de 2.0 m a été définie sur laquelle les mesures étaient faites (mesures radiométriques et prélèvement de l'ensemble des plantes). Les 50 cm restants du bloc servaient de zone tampon entre les placettes. Une placette représentait donc 1.8m², soit environ 20 plantes. Sur la Figure 3-1, l'ensemble des blocs ainsi délimités est représenté. On a également indiqué la position des blocs sur lesquels ont été faits le suivi de la levée et les mesures de bilan de PAR dans le couvert. A l'est de la parcelle, étaient disposés les mesures de flux de PAR et rayonnement global incidents, ainsi que les acquisitions de données.

3.1.2 Données climatiques

Nous avons utilisé les données de la station météorologique de Mons-en-Chaussée, appartenant au réseau du Service Technique d'Etudes des Facteurs Climatiques de l'Environnement (INRA), qui est située à 100m de la parcelle. Le rayonnement global incident (RG), la température à 2m, la pluviométrie, et la vitesse de vent sont mesurés toutes les heures. Cette station ne mesurant pas les fractions diffuses et directes du rayonnement global, nous avons installé deux pyranomètres (de marque Kipp et Zonen, sensibles aux longueurs d'onde 0.3-3nm) sur la parcelle pour les mesurer. De même, pour le PAR, la composante directe a été mesurée par un capteur linéaire SLAMS (cf. Chartier *et al.*, 1989; Brisson *et al.*, 1992) et le PAR diffus par un capteur PAR Quantum Licor. Les capteurs destinés à la mesure des composantes diffuses des flux étaient disposés sur une platine équipée d'un

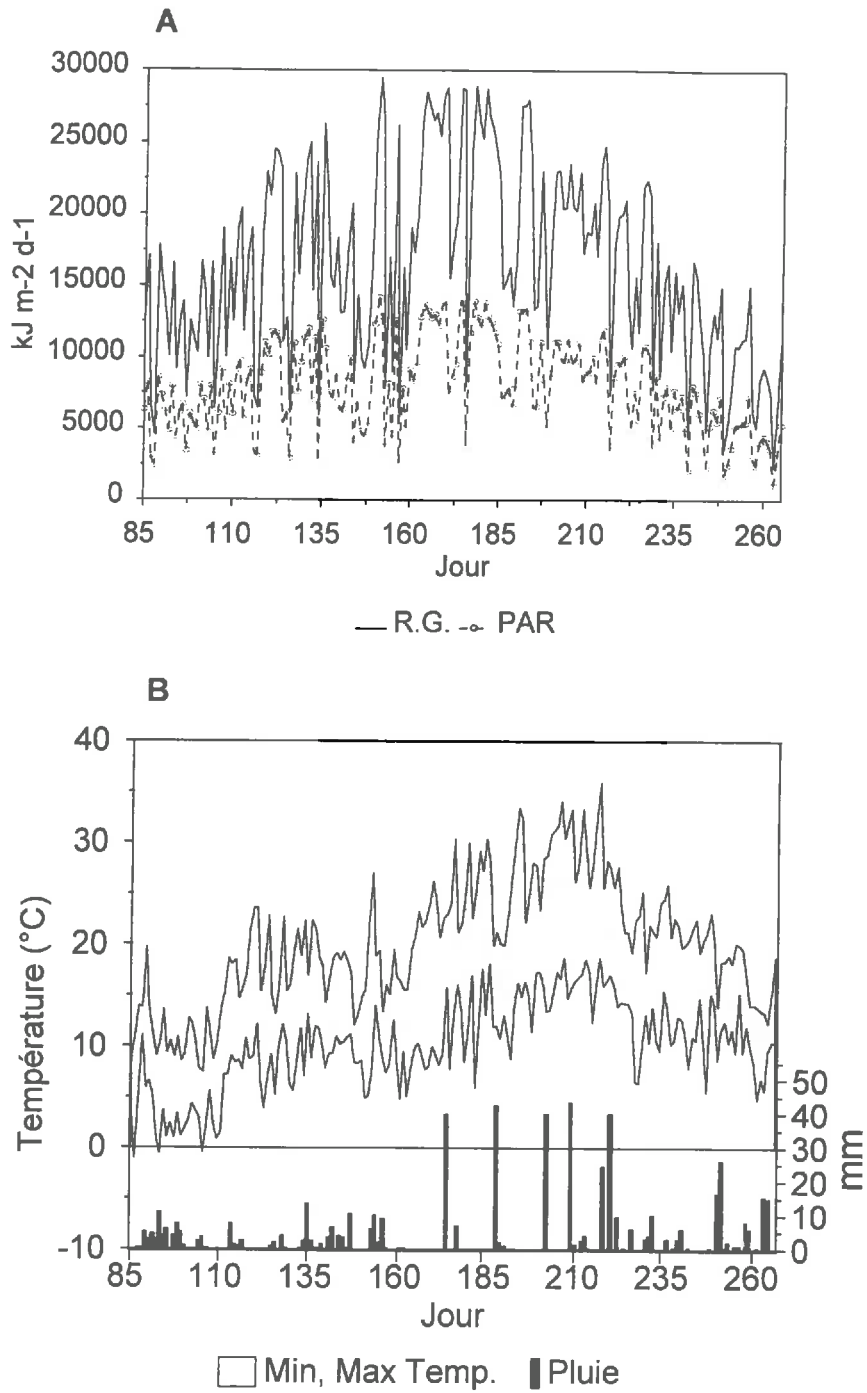


Figure 3-2. Évolution A) des flux de rayonnement RG et PAR incidents, et B) des températures de l'air maximum et minimum et de la pluviométrie. Les 5 jours où une irrigation a été réalisée sont ceux pour lesquels il y a plus de 40mm d'eau.

anneau équatorial permettant de masquer le flux provenant directement du soleil. Les données étaient enregistrées par une acquisition de données (CR10, Campbell Corp.) toutes les 10 secondes, puis moyennées toutes les dix minutes, pendant la période diurne.

L'évolution des flux de rayonnement RG et PAR incidents, des températures de l'air et de la pluviométrie est montrée à la Figure 3-2A, B.

3.1.3 Humidité du sol

Dans la zone réservée à ces mesures, deux séries de dix tensiomètres étaient installés de 15 à 190cm de profondeur. Le tensiomètre est une sonde en matière poreuse remplie d'eau dégazée et enterrée dans le sol (DTM5000, Nardeux humisol S.A.R.L., Tours, Fr.). Il est utilisé pour mesurer le potentiel matriciel d'eau du sol à une certaine profondeur. Il n'est utilisable que pour les potentiels matriciels entre 0 et -0.1MPa. Il doit être étalonné en faisant une régression linéaire des mesures sur l'humidité gravimétrique. La réserve d'eau totale dans le profil (volumétrique, par couche de 0-40, 40-100, et 100-200cm) mesurée à partir des tensiomètres est illustrée à la Figure 3-3. Les courbes expriment l'évolution de la réserve en eau des différentes couches de sol, telle qu'elle résulte du bilan des différents flux (évapotranspiration de la culture, infiltration d'eau et drainage). On constate que l'humidité jusqu'à 40cm de profondeur diminue rapidement après l'implantation du couvert (jour 155, LAI environs de 0.5). Le dessèchement du sol cause des "décrochements" des tensiomètres. Les tubes étaient rechargés en eau rapidement après leurs décrochements. Les périodes de fort dessèchement correspondent bien aux périodes de beau temps et fortes températures et où la culture est bien développée. L'humidité du sol en profondeur augmente rapidement après les irrigations, traduisant sans doute la présence de voies de circulation préférentielle de l'eau vers la profondeur (fissures du sol). Malgré nos efforts pour maintenir la culture en conditions d'alimentation en eau non limitante, de brèves périodes de stress hydrique sont apparues entre jours 175 et 200 (750- 1250°C·j).

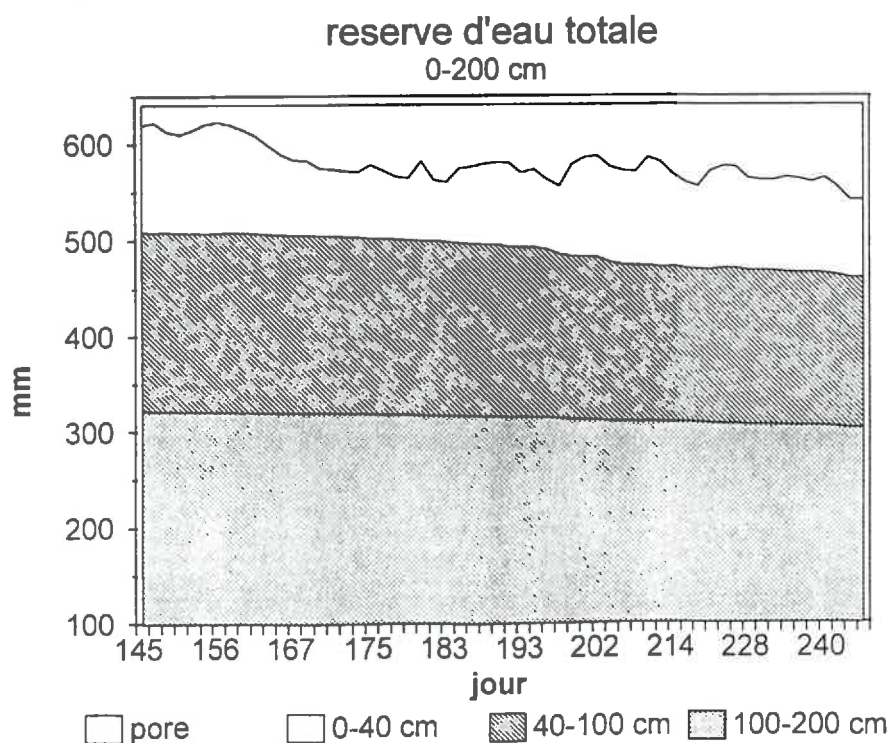


Figure 3-3. Évolution de la réserve d'eau totale du sol, 0-200cm.

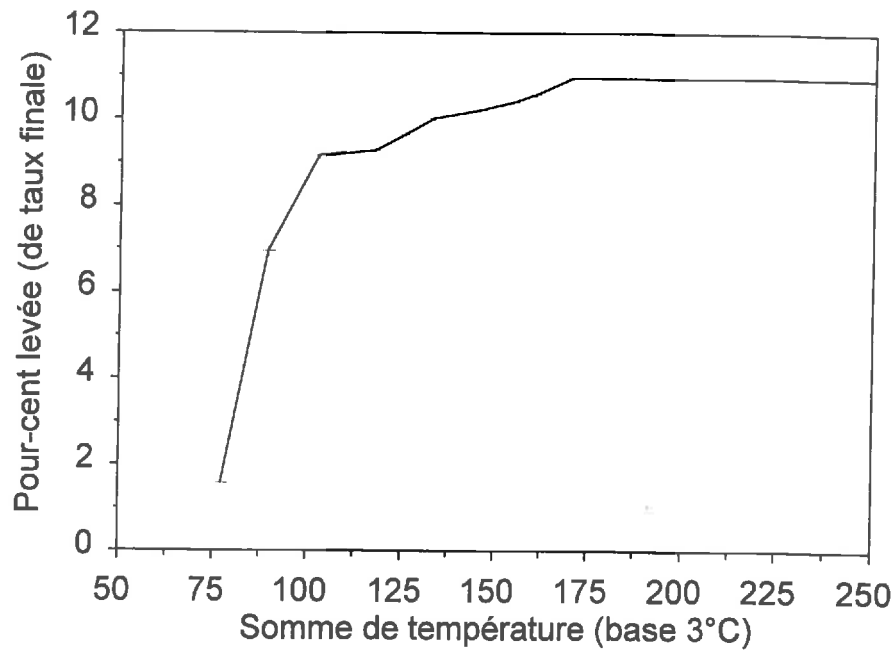


Figure 3-4. Taux de levée en pour-cent du taux final de levée, culture d'étalonnage.

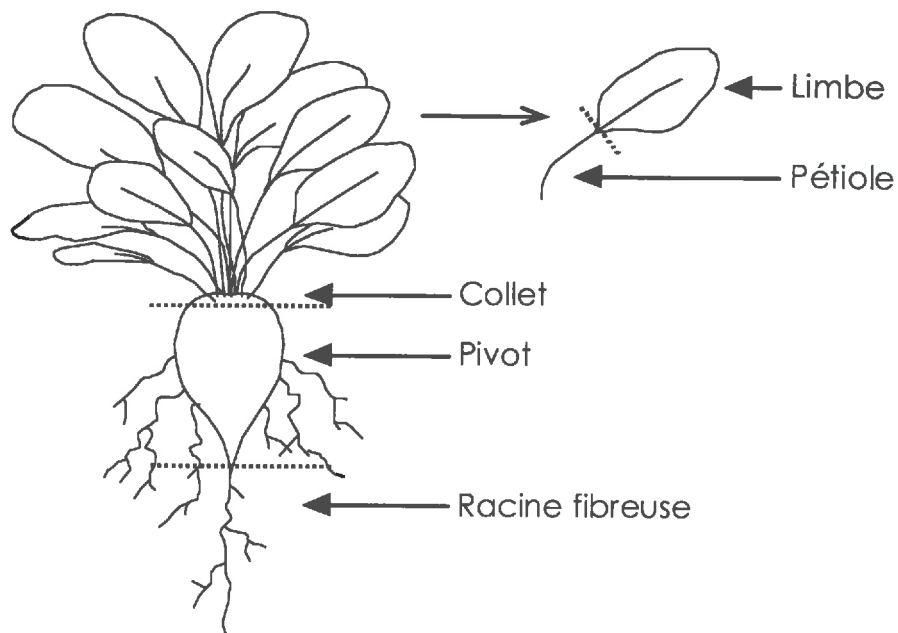


Figure 3-5. Les organes de la betterave.

3.1.4 Les mesures du couvert

3.1.4.1 Levée

La dynamique d'apparition des plantes a été enregistrée par marquage de la date de la levée de chaque plante dans 12 placettes (Figure 3-4). Les premières plantules ont commencé à franchir la surface à environ 80°C·j (base 3°C). Cela correspond bien à une levée sans obstacles pour une profondeur de semis de 2.5cm (Dürr *et al.*, 1992). Au jour correspondant à 102°C·j accumulés (base 3°C), environ 80% des plantes (exprimé en % du nombre final de plantes) ont levé. A partir de ≈110°C·j, la cinétique de levée ralentit jusqu'à la fin vers 175°C·j. Cette courbe est relativement lisse. Cela suggère que les plantules n'ont pas rencontré d'obstacles ou de résistance mécanique importante. Le taux final de levée est de 73.1%, ce qui correspond à 10.83 plantes·m⁻². Le faible ralentissement du taux d'émergence à 120°C·j pourrait être expliqué par des journées de fort ensoleillement après une pluie, ayant entraîné la formation d'une croûte à la surface du sol, et pourrait expliquer le relativement faible taux final de levée. Ce taux correspond toutefois au taux moyen de levée observé dans la région. Après un suivi de 71 parcelles dans la région, Duval et Boiffin (1990) ont en effet trouvé une densité moyenne de levée de 78.6% (écart type de 9.4%, min. 53.1%, max. 91.8%).

3.1.4.2 Mesures de croissance

Pour bien caractériser la croissance précoce, deux prélèvements hebdomadaires ont été faits pendant les 4 premières semaines. En mi-saison, les prélèvements étaient faits une fois par semaine et vers la fin de la saison toutes les deux semaines. Au total, 18 prélèvements ont été réalisés pour décrire la croissance des organes.

A chaque date, 6 placettes ont été désignées et les plantes entières (sans toutefois les racines fibreuses) ont été prélevées.

Une fois prélevées, les plantes ont été acheminées au laboratoire. Là, les racines des plantes ont été lavées ou brossées pour enlever la terre adhérente. Les plantes ont été comptées et pesées au niveau de chaque placette.

Au début, l'ensemble des plantes de la placette ont été traitées. A partir du moment où le volume des plantes à traiter est devenu trop important, on a procédé à un sous échantillonnage stratifié selon les tailles des plantes (3 classes).

Les organes (limbes, pétioles, collet, et racine stockage (pivot) (Figure 3-5) ont été séparés et pesés en frais. La masse sèche a été mesurée après séchage à l'étuve à 80°C pendant deux jours. Les masses ont ensuite été extrapolées à l'ensemble de la placette ($MS_{org-plac}$) en utilisant la représentation en masse sèche des différents organes ($MS_{org-éch}/MS_{tot-éch}$) et celle du sous-échantillon ($MS_{tot-éch}$) par rapport à l'ensemble des plantes de la placette ($MS_{tot-plac}$):

$$MS_{org-plac} (g) = \frac{MS_{tot-éch}}{MS_{tot-plac}} \cdot \frac{MS_{org-éch}}{MS_{tot-éch}} (g)$$

Eq. 3-1

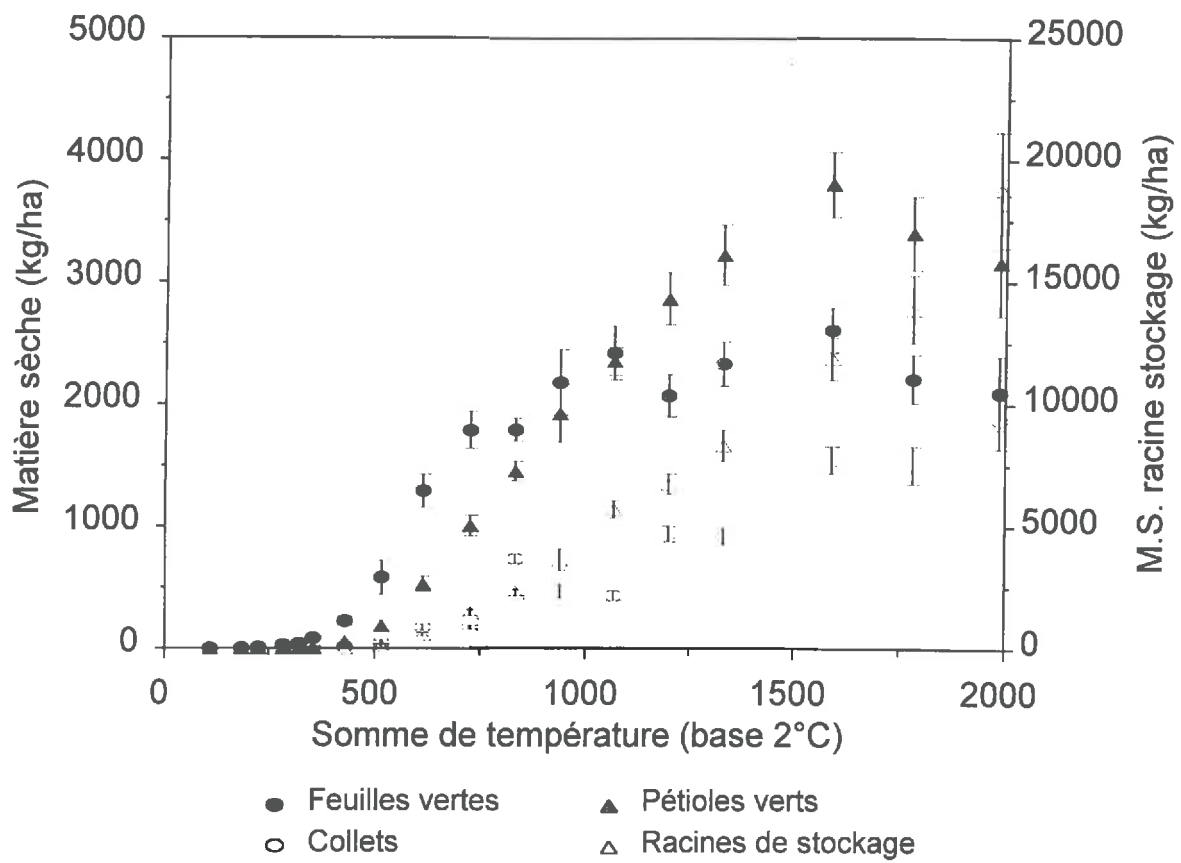


Figure 3-6. Masses sèches des organes mesurés plus et moins les écarts types des 6 blocs de la culture d'étalonnage, Mons-en-Chaussée, 1994.

Sur un sous échantillon de limbes verts, la surface des limbes (S_{lim}) a été mesurée grâce à un planimètre (LICOR 2000 Area-meter). La masse sèche de l'échantillon (MS_{lim}) a ensuite été mesurée, permettant d'obtenir le rapport surface/masse, encore appelé **SLA** (specific leaf area):

$$SLA = \frac{S_{lim}}{MS_{lim}} (cm^2 \cdot g^{-1})$$

Eq. 3-2

Les masses moyennes des différents organes et les écart-types ont été calculés à partir des valeurs des six placettes et les masses en $kg \cdot ha^{-1}$ calculées.

$$MS_{org} = MS_{org - plac} \cdot \frac{1}{1.8} \cdot 10 (kg \cdot ha^{-1})$$

Eq. 3-3

De même, les LAI moyens (en $ha \cdot ha^{-1}$) et les écart-types associés ont été calculés à partir des masses sèches de limbes par unité de surface.

$$LAI = SLA \times 10^{-5} \cdot MS_{lim} (ha \cdot ha^{-1})$$

Eq. 3-4

Les masses des organes aériens verts et des organes de stockage (pivots) sont présentées à la Figure 3-6. La culture était récoltée 135 jours après la levée (une durée de $1986^{\circ}C \cdot j$ accumulés, base $2^{\circ}C$).

En ce qui concerne la croissance en masse des feuilles, on constate des chutes de feuille coïncidant avec les épisodes de stress hydrique (vers $800^{\circ}C \cdot j$ et $1200^{\circ}C \cdot j$). On note que la croissance des pétioles n'a pas été affectée. Une décroissance nette commence vers $1600^{\circ}C \cdot j$ à cause de l'âge (augmentation de la sénescence, baisse de la production nette d'assimilats).

Les masses des collets pour les quatre prélèvements à 833., 1068., 1200., et $1536^{\circ}C \cdot j$ étaient suspectes. Pour chaque date, une nouvelle masse a été déterminée par interpolation linéaire entre les prélèvements qui l'encadraient. Les différences entre les nouvelles et anciennes valeurs ont été mises dans les masses des pivots. En effet, la détermination exacte de la partie "collet" (au dessous du point d'insertion des premières feuilles) est très délicate et susceptible de larges variations. Il est apparu que, relativement, la masse des collets mesurée pendant l'expérience était d'environ 30% supérieure à celle simulée par SUCROS; Nous avons attribué cet écart à une mauvaise définition de la découpe de cet organe. Un ajustement de -30% des mesures du collet a re-situé les masses dans un ordre de grandeur semblable à celui de SUCROS et plus proche des mesures de collet faites à la récolte par les sucreries. La correction négative de masse a été affectée comme correction positive aux pivots, cette correction représentant très peu par rapport à la masse du pivot.

La croissance des racines où se fait le stockage de sucres (pivots) démarre aux environs de $500^{\circ}C \cdot j$; après une phase brièvement exponentielle, elle devient approximativement linéaire après $750^{\circ}C \cdot j$.

Les organes sénescents (feuilles et pétioles) ont également été mesurés, mais leurs masses ne seront pas utilisées, à cause de la faible fiabilité des mesures. En effet, ce sont des organes qui se dégradent rapidement au contact du sol (surtout les feuilles) et après plusieurs jours ils disparaissent : les mesures faites sous-estiment toujours la vraie biomasse sénescente. De même, les racines fibreuses

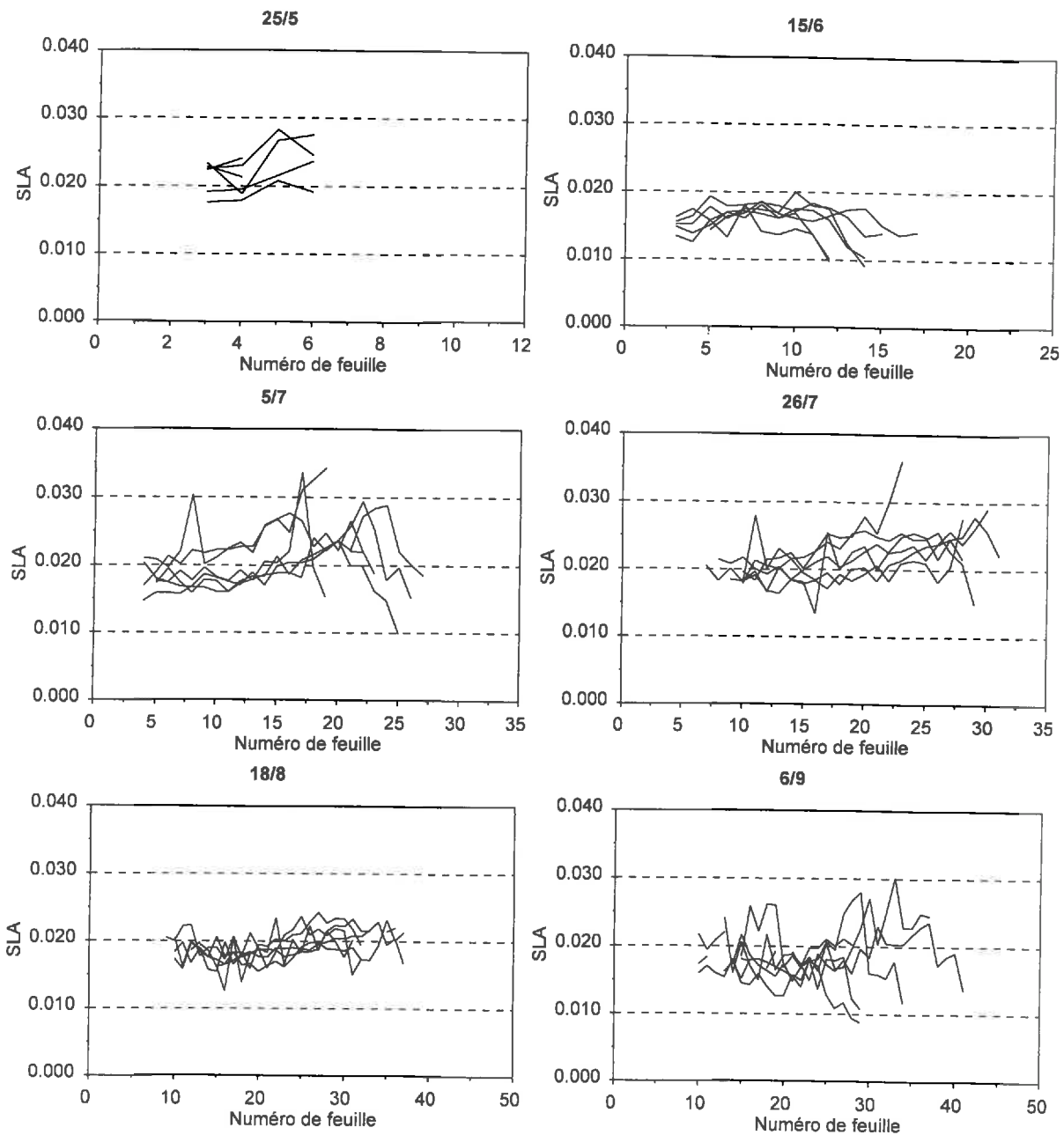


Figure 3-8. Mesures du rapport surface-masse des limbes (SLA, $\text{ha} \cdot \text{kg}^{-1}$) en fonction du numéro d'apparition des feuilles. Les petites feuilles (<5mm) sont exclues, Mons-en-Chaussée, 1994.

sont très difficiles à extraire et mesurer avec précision et n'ont donc pas été prélevées. Les masses de ces organes (organes sénescents et racines fibreuses) seront estimées à partir des fonctions de répartition des assimilats du modèle SUCROS (cf. chapitre suivant).

Le LAI, et les écart-types associés, sont montrés à la Figure 3-7. Il a la même allure que les masses des feuilles vertes.

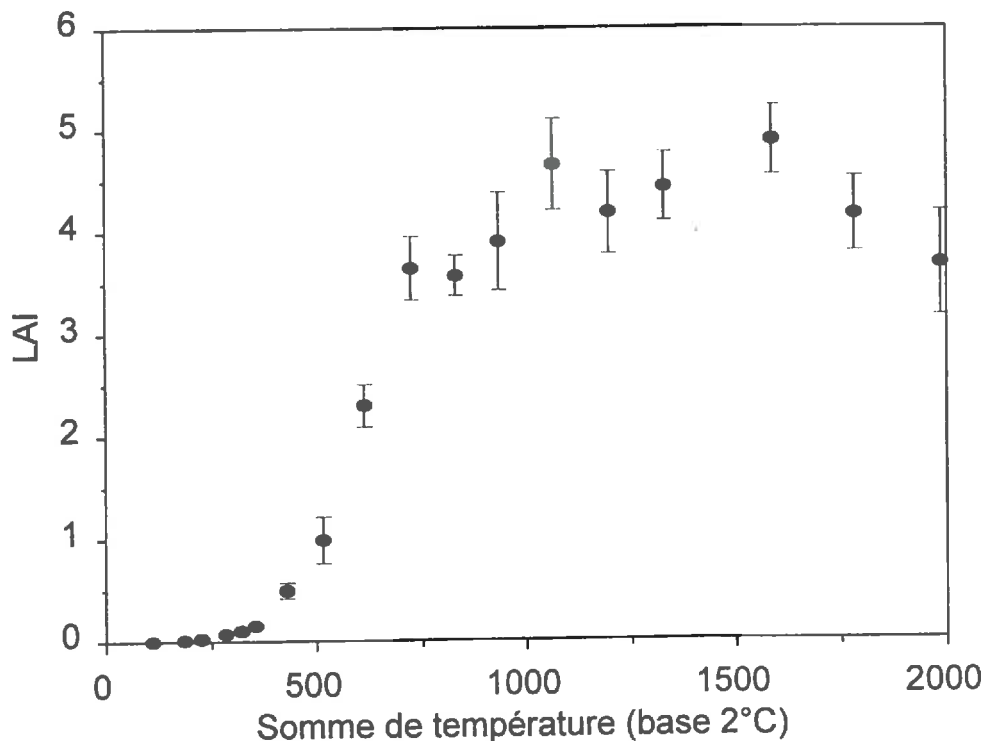


Figure 3-7. LAI (moyennes et écarts types) des 6 blocs de la culture d'étalonnage, Mons-en-Chaussée, 1994.

3.1.4.3 Suivi précis de la croissance des feuilles

En parallèle des prélèvements de 6 placettes, un suivi plus ponctuel du développement des surfaces des feuilles a été fait, une fois par semaine, sur six plantes prélevées dans la surface réservée à ces mesures (cf. Figure 3-1). Il s'agissait de suivre l'apparition et la croissance individuelle en masse et en surface des feuilles. Ces mesures nous ont servi à étudier la variabilité de leur surface spécifique (SLA; $\text{ha}\cdot\text{kg}^{-1}$). Les numéros d'ordre des feuilles ont été notés pour chaque plante par des fils de laine colorés sur environ 150 plantes. Un excès de plantes a été suivi pour permettre de sélectionner six plantes approximativement de la même taille. Cela a permis aussi de rejeter les plantes abîmées par accident. Comme ces prélèvements sont destructifs, il n'y a pas un suivi individuel des plantes. Même quand les plantes d'une taille semblable ont été prélevées les nombres des feuilles et tailles des feuilles étaient très variables.

Un échantillon des résultats obtenus pour quelques dates est montré à la Figure 3-8. On n'observe pas de tendance dans l'évolution de la surface spécifique des feuilles en fonction de leur numéro d'ordre d'apparition. On observe par contre une certaine variabilité entre plantes, qui rappelons-le, n'ont pas toutes le même stade foliaire au jour du prélèvement. La valeur moyenne du SLA est autour de 0.02

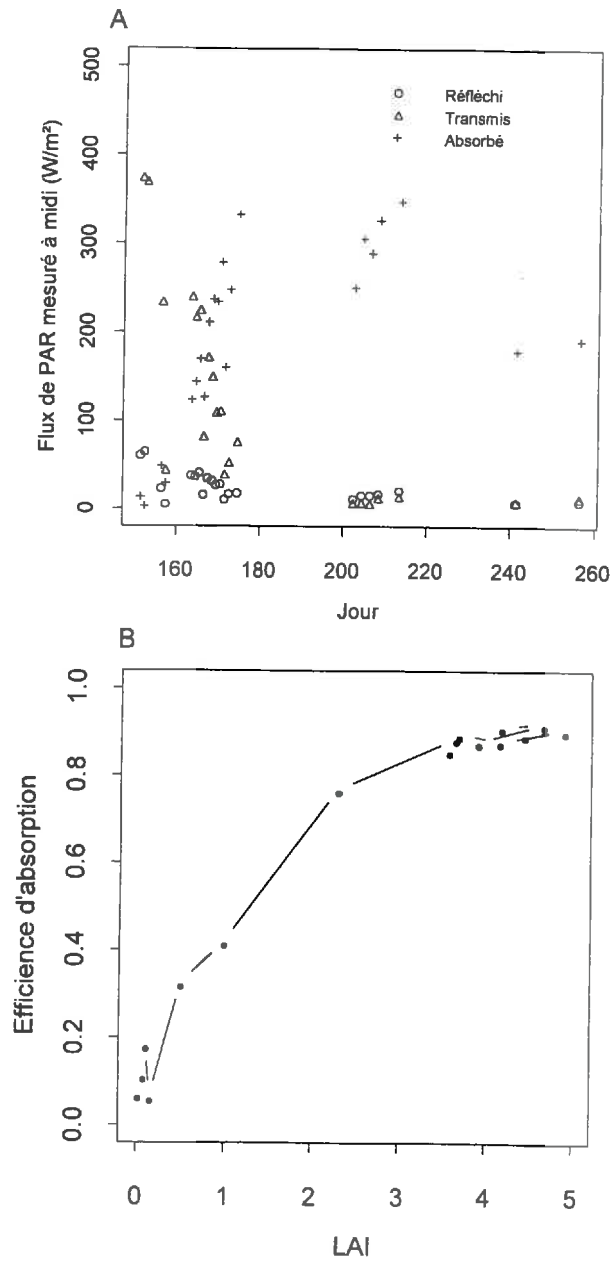


Figure 3-9. Mesures pour le bilan radiatif dans le PAR. A) Les flux de PAR réfléchi, transmis, absorbé) mesurés à midi solaire au cours de la saison. B) Evolution de l'efficience d'absorption du PAR en fonction du LAI.

ha·kg⁻¹ pour l'ensemble des feuilles et des dates, sauf trois dates particulières (15/6, montré; 1/6 non montrés). Ces dates ont un SLA plus faible, c'est à dire que la surface est trop faible ou la masse sèche est trop importante, sans qu'elles correspondent à un incident remarquable dans la parcelle comme un traitement herbicide ou une sécheresse plus marquée.

3.1.4.4 Bilan radiatif dans le PAR

Les mesures des différents termes du bilan radiatif dans le PAR ont été faites pour permettre d'estimer le PAR intercepté par la culture. Un ensemble de seize capteurs linéaires SLAM (Chartier *et al.*, 1989) ont été mis en place après l'implantation. Les capteurs linéaires mesuraient le PAR transmis au sol (12), réfléchi par la végétation (3) et sol nu (1), le PAR incident diffus et direct étant également mesurés (section 3.1.2).

D'après Varlet-Grancher *et al.* (1989), le PAR absorbé par la culture (APAR) est calculé par:

$$APAR = (PAR_O + PAR_{RS}) - (PAR_T + PAR_R) \quad \text{Eq. 3-5}$$

où l'indice *O* est pour le PAR total incident, *RS* pour le flux réfléchi de la surface du sol, *T* pour la fraction transmise au sol, et *R* pour le flux sortant de la canopée.

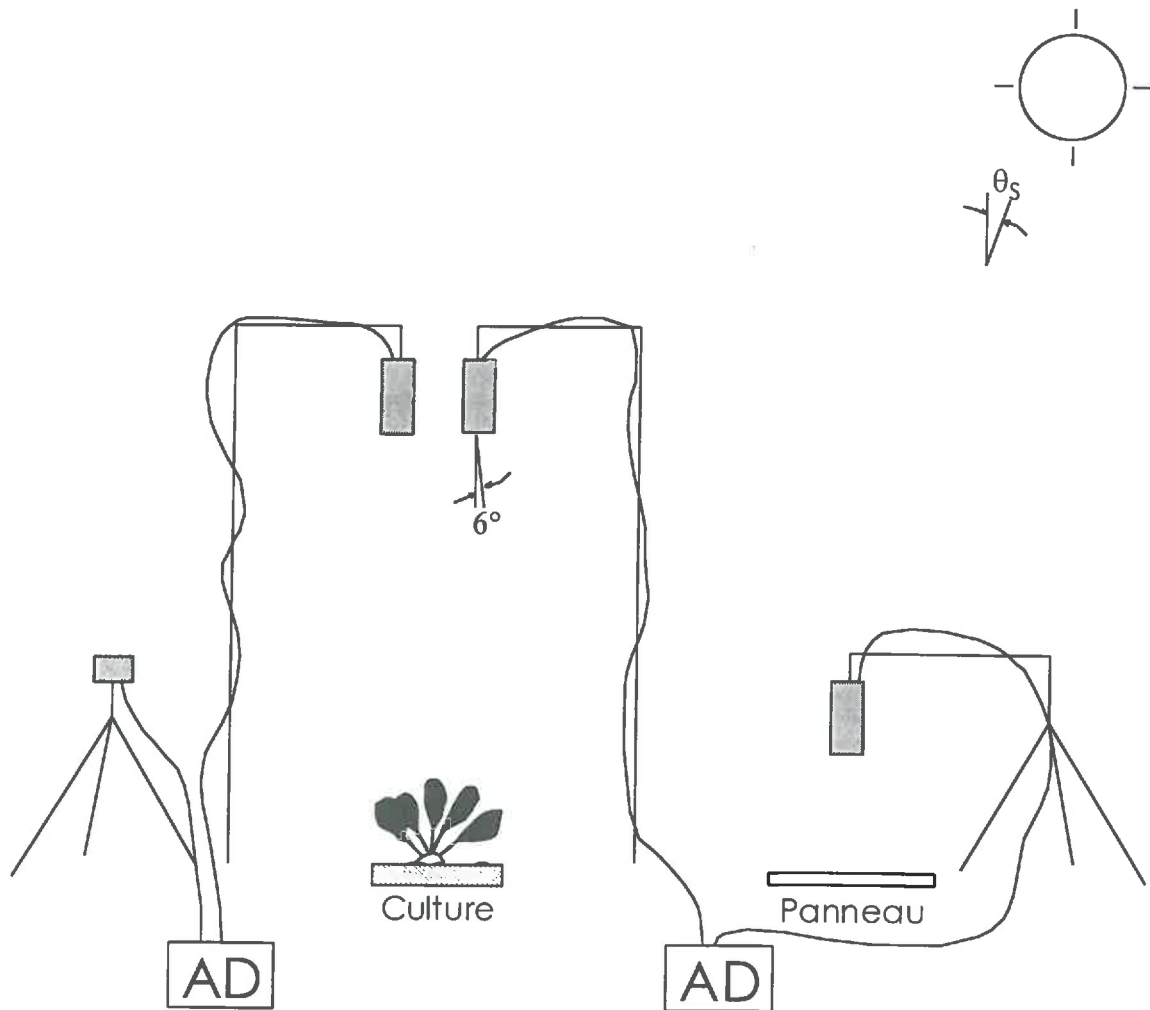
Le modèle d'absorption de SUCROS considère un couvert complètement fermé et modélise l'absorption du rayonnement incident par une fonction de type atténuation. Pour que les mesures du bilan radiatif soient cohérentes avec la façon de modéliser, nous avons calculé APAR par la formule suivante:

$$APAR = PAR_O - PAR_T - PAR_R \quad \text{Eq. 3-6}$$

où le PAR réfléchi par le sol et absorbé par les feuilles n'est pas pris en compte (Gallagher et Biscoe, 1978). La quantité de PAR_{RS} représente des valeurs faibles lorsque le sol est complètement couvert par des feuilles ou que la surface du sol est humide. Cependant, elle représente des fortes valeurs en phase d'installation de la culture et quand la surface du sol est sèche, ce qui se répercute sur PAR_R

La Figure 3-9A montre d'abord les mesures de l'évolution au cours de la saison de PAR incident, transmis, réfléchi et APAR. Seules les mesures à midi solaire sont montrées. Les mesures ponctuelles sont variables selon l'intensité du PAR incident. Le PAR transmis diminue et le PAR absorbé augmente avec l'installation du couvert vers les jours 155-160. Le PAR réfléchi diminue rapidement quand la réflectance du sol devient moins importante.

La Figure 3-9B montre le rapport APAR-PAR₀ (efficacité d'absorption du PAR) en fonction du LAI. Seules les mesures d'APAR très proches des jours de prélèvement ont été utilisées de manière à minimiser l'erreur sur la valeur de LAI. Pour cette raison, il y a peu de points entre 1.0 et 3.5 de LAI quand la croissance est très rapide. Certaines mesures durant la saison ont été éliminées en raison de l'état de salissement des capteurs. La courbe a une forme classique d'exponentielle négative exprimant l'absorption du rayonnement par le LAI. Même à des fortes valeurs de LAI, l'absorption n'est pas 100% à la cause de la fraction du rayonnement réfléchi par la canopée. La variabilité de l'efficacité aux faibles valeurs du LAI est introduite par des erreurs sur les mesures de rayonnement



Réflectancemètre 3bandes

Réflectancemètre 5bandes

Figure 3-10. Configuration des deux réflectancemètres CIMEL 3bandes et 5bandes.

(représentativité du positionnement des capteurs de PAR transmis pour de très faibles LAI) et l'importance de la réflectance du sol, très variable en fonction de l'état du sol, dans la composante PAR réfléchi du calcul de PAR absorbé (cf Eq.3-6).

3.1.4.5 Réflectance bidirectionnelle

Les mesures de la réflectance spectrale ont été faites par l'un ou l'autre de deux réflectancemètres CIMEL (CIMEL Electronique, France) reliés à une centrale d'acquisition de données. Le premier (C3) a trois bandes spectrales dans le vert, le rouge, et le proche infrarouge (PIR). Le deuxième réflectancemètre (C5) a été utilisé quand il était disponible et a deux bandes spectrales supplémentaires, une dans le bleu et une dans le moyen infrarouge. Les caractéristiques spectrales définies par des filtres sont décrites dans le Tableau 3-1. Le C3 comporte 3 détecteurs au Silicium chacun équipé d'un filtre spécifique; le C5 comporte 2 détecteurs; l'un au Silicium (pour les bandes visibles et proche infrarouge), l'autre au Germanium (pour les bandes proche infrarouge -redondant- et moyen infrarouge); les filtres sont installés sur un porte filtres qui se déplace devant les détecteurs.

Tableau 3-1. Caractéristiques spectrales des réflectancemètres.

Réflectancemètre	Bandes spectrales (nm)				
	Bleu	Vert (XS1)	Rouge (XS2)	Proche infrarouge (XS3)	Moyenne infrarouge
Cimel 3bandes: C3	-	500-590	620-680	790-890	-
Cimel 5bandes: C5	436-476	505-577	622-672	787-891	1560-1760

Les réflectancemètres sont composés de deux radiomètres (Figure 3-10). Dans les deux cas, l'un des radiomètres est suspendu au bout d'une perche et mesure la luminance au nadir de la culture, avec un angle d'ouverture de 12°.

Le C3 mesure la réflectance hémisphérique-directionnelle par le rapport entre la luminance directionnelle de la culture et l'éclairement hémisphérique. Ce dernier est mesuré par l'autre radiomètre, dont les ouvertures des 3 canaux, hémisphériques, sont équipées de diffuseurs; il est disposé horizontalement sur un trépied et vise le ciel. Les deux radiomètres sont reliés à une acquisition de données (CR10, Campbell Scientific, Ltd. Leicestershire, UK) qui assure à la fois la programmation de l'acquisition, l'alimentation électrique des capteurs et le stockage des données.

Le C5 mesure la réflectance par le rapport entre la luminance directionnelle de la culture et la luminance directionnelle d'un réflecteur parfait. Ce dernier est constitué par un panneau de Spectralon. Les deux radiomètres sont reliés à une centrale spécifique CIMEL qui assure la programmation, l'alimentation, le défilement motorisé des filtres devant les détecteurs ainsi que le stockage des données.

Comme tous les capteurs électroniques, les réflectancemètres doivent être étalonnés. Les signaux électriques qu'ils délivrent doivent être convertis en unités de réflectance.

Étalonnage du réflectancemètre 3bandes.

Il y a deux objectifs principaux dans l'étalonnage. Premièrement c'est de déterminer les coefficients d'étalonnage liés au réglage des radiomètres (gains, courants d'obscurité). Deuxièmement, de corriger d'éventuels biais de la mesure (liés aux caractéristiques de construction des radiomètres). Le principal biais concerne le radiomètre d'éclairement qui doit être corrigé de sa mauvaise réponse en fonction du cosinus de l'angle zénithal du soleil (Gu, 1991; Gu et Guyot, 1993). Cette erreur est variable selon la fraction du rayonnement diffus à cause de l'anisotropie du ciel. Cette correction peut-être établie à partir de mesures en laboratoire où l'on fait varier les angles zénithaux d'éclairement, ou à l'extérieur aux différents angles solaires.

C'est ce que nous avons fait, en empruntant la méthode d'étalonnage à Baret (1990), modifiée par Guérif (pers. comm.). La méthode est fondée sur la mesure de la réflectance d'un panneau de référence (Spectralon) dont la réponse directionnelle est connue. Une base de données a été acquise le 20 juillet 1995, au cours de la journée sous un ciel dégagé (le rapport Diffus/Global ou encore la fraction du rayonnement diffus était d'environ 20%).

Le radiomètre d'éclairement vise le ciel et mesure les flux incidents (diffus+direct), alors que le radiomètre de luminance mesure le flux directionnel réfléchi par le panneau. Chaque radiomètre mesure l'énergie et donne un signal en millivolts (V). Notez que tous les flux sont spectraux.

Vingt-huit périodes de mesures ont été faites avec 180 répétitions chaque fois. Chaque mesure durait environ 4 minutes. Au total il y a plus de 5000 répétitions. La fraction du rayonnement diffus a été déterminée après chaque période de 28 mesures.

1. Caractérisation de la réflectance du panneau blanc (ρ_{pan}) à partir de mesures au laboratoire.

La réflectance bidirectionnelle du panneau blanc (mais pas *parfaitement* lambertien) est donnée par:

$$\rho_{pan} = \rho(0, \theta_s)(1 - \nu_i) + \rho(0, h)(\nu_i)$$

Eq. 3-7

⇒ où $\rho(0, \theta_s)$ est la réflectance bidirectionnelle du panneau, mesurée au nadir avec un angle θ_s de la source d'éclairement. Elle peut être décrite par un polynôme de Legendre (Baret, 1992),

$$\rho(0, \theta_s) = C \left[a + b \cos(\theta) + \frac{c}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) + \frac{d}{2} (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta) \right]$$

Eq. 3-8

avec les coefficients:

Tableau 3-2. Paramètres du polynôme de Legendre de la réflectance bidirectionnelle du panneau (Baret, 1992).

Surface	C	Coefficients					
		XS1	XS2	XS3	a	b	c
Spectralon	0.9835	0.9845	0.9845	-0.1371	2.2477	-1.4110	0.4126

⇒ D/G représente la fraction de rayonnement diffus dans le rayonnement global.

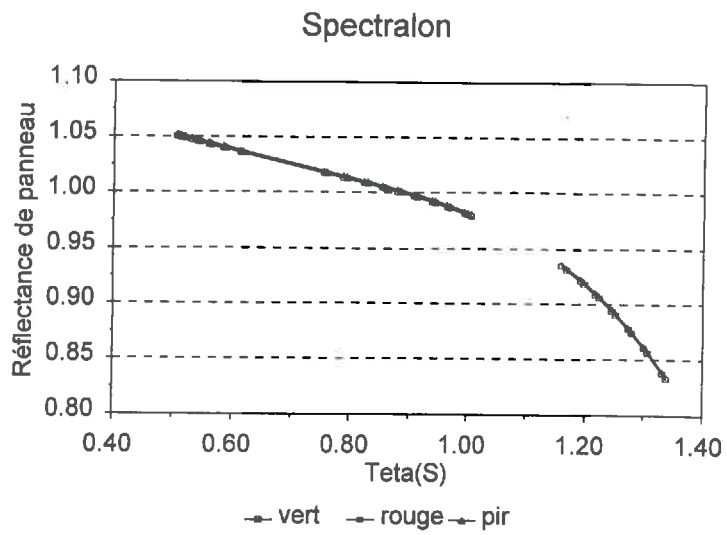


Figure 3-11. Évolution de la réflectance du panneau de Spectralon selon l'angle zénithal solaire θ_S .

⇒ $\rho(0, h)$ est la réflectance directionnelle hémisphérique du panneau pour le rayonnement diffus, pour une visée au nadir. Les valeurs de h ont été établies par Baret (1992): $h(XS1) = 0.992$; $h(XS2) = 0.993$; $h(XS3) = 0.993$.

L'évolution de ρ_{pan} calculée par l'Eq. 3-7 pour les périodes de mesures in situ et pour les trois bandes spectrales sont montrées à la Figure 3-11.

2. Etalonnage des radiomètres à partir des mesures de réflectance *in situ* du panneau blanc (ρ_{pan}):

$$\rho_{pan3b} = \alpha \cdot S$$

Eq. 3-9

La réflectance bidirectionnelle du panneau blanc est calculée par le rapport entre les mesures des deux radiomètres (S), moyennant un coefficient d'étalonnage (α) lié au réglage des radiomètres et une correction de la mesure d'éclairement pour sa mauvaise réponse en cosinus de l'angle zénithal du soleil (θ_s):

$$S = \frac{(V_{lum} - V_{lum0})}{[(V_{ec1} - V_{ec10})(g(\theta_s)(1 - D/G) + k(D/G))]}$$

Eq. 3-10

où le facteur S est décrit par:

⇒ V_{lum} et V_{ec1} est le signal mesuré par les radiomètres en mV pour la luminance et l'éclairement. Les courants d'obscurité V_{lum0} et V_{ec10} sont négligeables dans notre cas.

⇒ $g(\theta_s)$ et k sont des facteurs de correction pour la non-réponse en cosinus de la tête d'éclairement.

- k pour le rayonnement diffus isotrope. Les valeurs de k ont été établies pour notre radiomètre par Baret (1992): $k_{XS1} = 1.058$; $k_{XS2} = 1.198$; $k_{XS3} = 1.183$.
- $g(\theta_s)$ pour le rayonnement direct. Pour un radiomètre avec une réponse en cosinus parfaite, le signal varie en fonction du cosinus θ_s par:

$$V(\theta) = V(0) \cdot \cos(\theta)$$

Eq. 3-11

où $V(0)$ est le signal à l'angle zénithal maximum. Mais, pour un capteur imparfait, on introduit un facteur de correction $g(\theta_s)$ dans Eq. 3-10 qui est représenté par:

$$g(q_s) = \frac{V(0) \cdot \cos(q_s)}{V(q_s)}$$

Eq. 3-12

Nous avons pris pour la valeur $V(0)$ les mesures les plus proches du midi solaire ($\cos(\theta_s)=0.87$). Utilisant ces mesures et cette valeur de $V(0)$ dans l'Eq. 3-12, considérant que $g(\theta_s)$ était proche de 1.0, nous avons calculé le coefficient d'étalonnage, α , par le rapport S/ρ . Ces résultats sont présentés dans la Tableau 3-3.

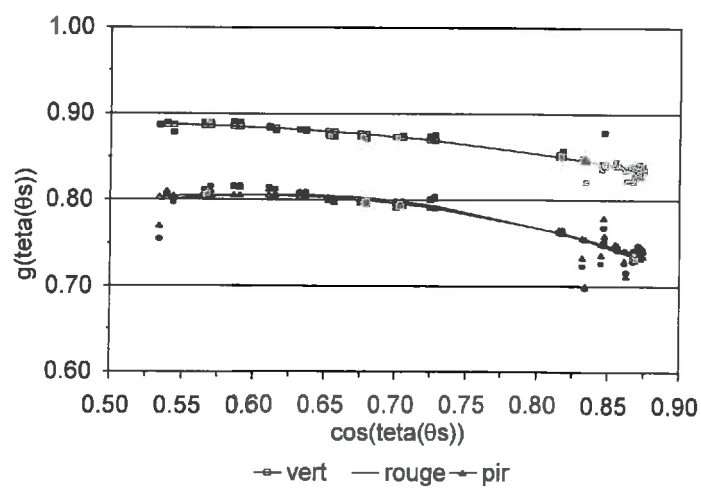


Figure 3-12. Évolution de $g(\theta_s)$ en fonction de $\cos(\theta_s)$ pour le réflectancemètre 3bandes CIMEL.

A partir des Eq. 3-10 et Eq. 3-12, $g(\theta_s)$ peut être exprimé par:

$$g(\theta_s) = \frac{\alpha(Vlum)}{Vecl} \frac{1}{(1-D/G)} - k(D/G)$$

Eq. 3-13

On montre dans la Figure 3-12 l'évolution de $g(\theta_s)$ ainsi calculé en fonction de $\cos(\theta_s)$, au cours d'un sous-ensemble des mesures. Les points représentent les mesures et les courbes les ajustements. $g(\theta_s)$ a alors été ajusté en fonction de $\cos(\theta_s)$, par un polynôme de degré trois de coefficients α , β , χ , et δ :

$$g(\theta_s) = \alpha + \beta \cos \theta_s + \chi \cos^2 \theta_s + \delta \cos^3 \theta_s$$

Eq. 3-14

Les résultats des ajustements des paramètres des polynômes sont présentés dans Tableau 3-3. Ces ajustements sont fiables dans les gammes des angles zénithaux solaires des mesures faites: $0.54 < \cos(\theta_s) < 0.87$ soit des angles solaires compris entre 30° et 56° ce qui encadre bien les moments où ont été faites les mesures radiométriques sur la culture.

Tableau 3-3. Résultats de l'ajustement de $g(\theta_s)$ et de la détermination de α .

Bande	Coefficient d'étalonnage α (Eq.3-9)	Paramètres du polynôme $g(\theta_s)$ ajusté (Eq. 3-14)			
		α	β	χ	δ
XS1 (vert)	0.917	3.4464	-10.8146	15.276	-7.2129
XS2 (rouge)	2.345	1.1499	-1.5848	2.862	-1.7396
XS3 (PIR)	1.040	2.7173	-8.0534	11.632	-5.6858

Etalonnage du réflectancemètre 5bandes.

Le réflectancemètre C5 a été inter-étalonné avec le réflectancemètre C3 pour pouvoir assurer la cohérence des mesures. Pour cela, pendant une journée de mesures (28/08/1994), les deux radiomètres 1 et 2 du C5 ont été installés aux côtés du radiomètre C3 au-dessus du panneau de référence. La réflectance se calcule directement par le rapport des tensions délivrées par les 2 radiomètres, en tenant compte des différences de réglage électronique des 2 radiomètres ($V1 = c \cdot V2$):

$$r = c \cdot \frac{V_1}{V_2}$$

Eq. 3-15

L'inter-étalonnage des deux réflectancemètres (pour les bandes vertes, rouges, proches infrarouges seulement) est donné par:

$$\frac{r_{5b}}{r_{3b}} = a \cdot \rho_{pan} + b$$

Eq. 3-16

où r_{5b} est le facteur de réflectance non corrigé des différences de réglage des radiomètres, ρ_{3b} est la réflectance mesurée par le réflectancemètre 3bandes, a et b sont les résultats de la régression linéaire du rapport r_{5b}/ρ_{3b} contre la réflectance du panneau, ρ_{pan} . Les résultats des régressions de l'Eq. 3-16

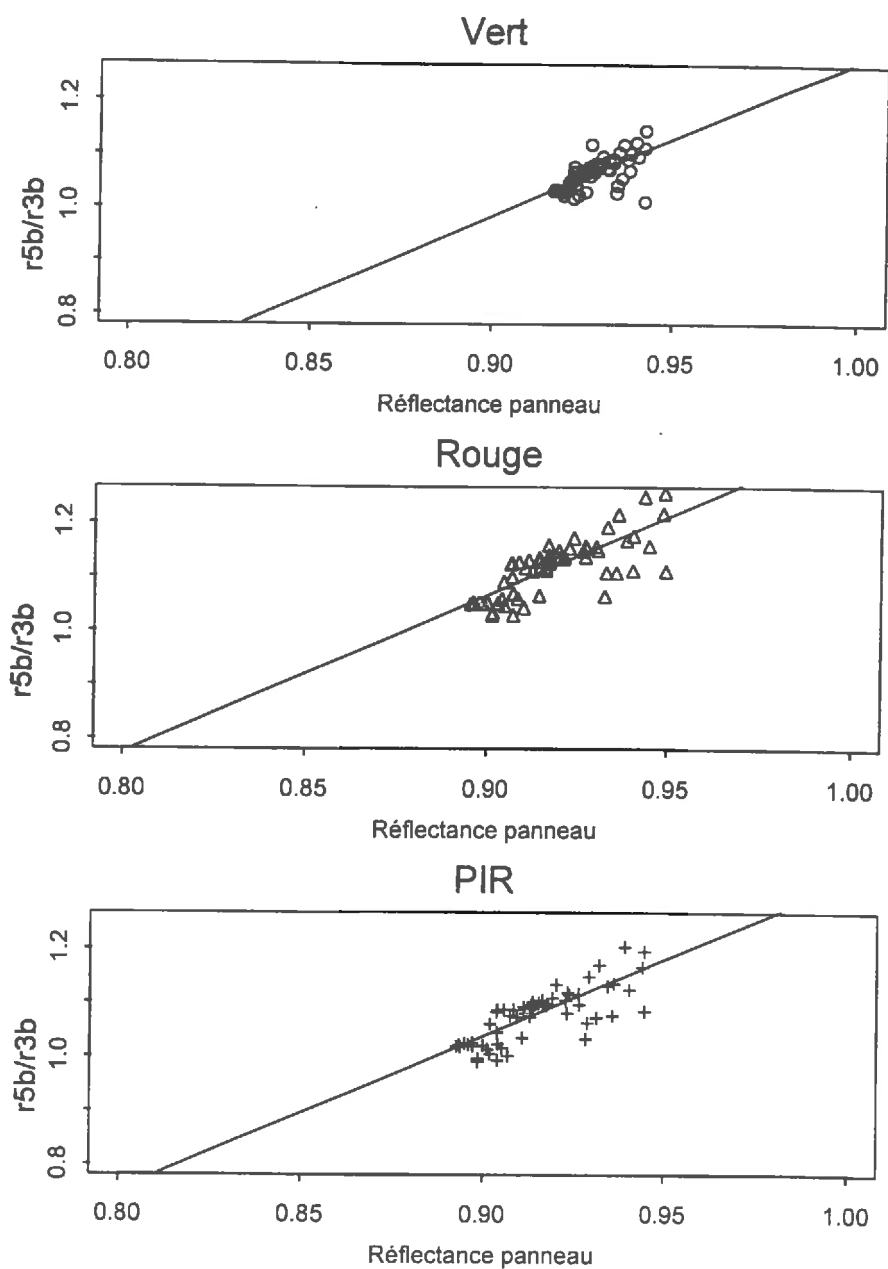


Figure 3-13. Evolution du rapport $r5b/r3b$ entre les deux réflectancemètres CIMEL en fonction de la réflectance du panneau de référence (journée du 24/08/1994).

Tableau 3-4. Résultats de l'inter-étalonnage du réflectancemètre 5bandes avec le réflectancemètre 3bandes (cf. Eq. 3-17).

	α	b	Erreur Standard Résiduelle
XS1	2.919	-1.646	0.0196
XS2	2.913	-1.557	0.0316
XS3	2.844	-1.524	0.0295

sont montrés dans la Figure 3-13 et les coefficients sont dans la Tableau 3-4. La réflectance corrigée ρ_{5b} pour le réflectancemètre 5bandes, équivalente à ρ_{3b} est donc:

$$\rho_{5b} = \rho_{3b} = \frac{r_{5b}}{a \cdot \rho_{pun} + b}$$

Eq. 3-17

Les mesures de la réflectance sur le couvert.

Les mesures radiométriques sur le couvert ont été effectuées sur les six placettes correspondant à celles qui feraient l'objet du prochain prélèvement (ou le plus proche possible) pour avoir le meilleur rapprochement possible entre mesures de LAI et de réflectance. La fréquence visée pour les mesures était de 1 fois par semaine, mais la fréquence des ciels couverts n'a pas autorisé cette fréquence. Les mesures étaient faites en milieu de journée, proche du midi solaire. Le radiomètre porté par la perche était situé à une hauteur de 2.5m, ce qui, compte tenu de l'angle d'ouverture de 12°, donne comme surface visée au sol un disque de 52cm de diamètre. L'éclairement a été mesuré en parallèle de la luminance, la tête d'éclairement étant fixée sur un mât, en position rigoureusement horizontale (les mesures sont très sensibles à tout défaut d'horizontalité qui entraîne des erreurs importantes sur le calcul de la réflectance). Quatre répétitions par placette ont été faites: deux sur l'inter-rang et deux sur le rang. Le LAI a été calculé par une interpolation linéaire quand le LAI n'a été mesuré le jour de réflectance ou le jour précédent. La fraction du rayonnement diffus a été déterminée par les mesures faites par les deux pyranomètres placés, l'un sous l'anneau équatorial, l'autre en plein soleil. Pendant les mesures de réflectances, les acquisitions faites par ces deux pyranomètres étaient temporairement programmées avec le même pas de temps que les mesures de réflectance (1 mesure toutes les 2 secondes).

La Figure 3-14 montre l'évolution au cours du cycle de la culture de la réflectance du couvert dans le proche infrarouge et le rouge en fonction du LAI. On note des "trous" où il manque des mesures (entre 0.25-1.0LAI et 1.5-3.5LAI) à cause d'un ciel souvent nuageux pendant la période croissance rapide du LAI. On constate également la réflectance de PIR est plus variable que le rouge à toutes des niveaux de LAI. Comme les propriétés optiques des feuilles vertes sont peu variables dans le PIR et la transmittance est importante, c'est très probablement que la réflectance varie à cause de la variabilité spatiale de la structure des plantes dans les six placettes de mesures.

Les mesures de la réflectance sur le sol.

La réflectance du sol contribue à la réflectance du couvert, surtout pour les faibles taux de couverture. C'est un des paramètres importants du modèle de réflectance qu'il faut connaître pour chaque mesure de réflectance de couvert. Or la mesure in situ est difficile, puisqu'il faudrait la faire sur le sol qui est sous les plantes, sans le perturber (ce qui se passe si on arrache les plantes après la mesure sur le couvert), un sol maintenu nu de façon permanente n'ayant pas les mêmes caractéristiques d'humidité.

Considérant que l'humidité est le principal facteur de variation de la réflectance du sol, on se borne en fait à mesurer l'humidité de surface du sol sous le couvert et l'on utilise une relation humidité de la

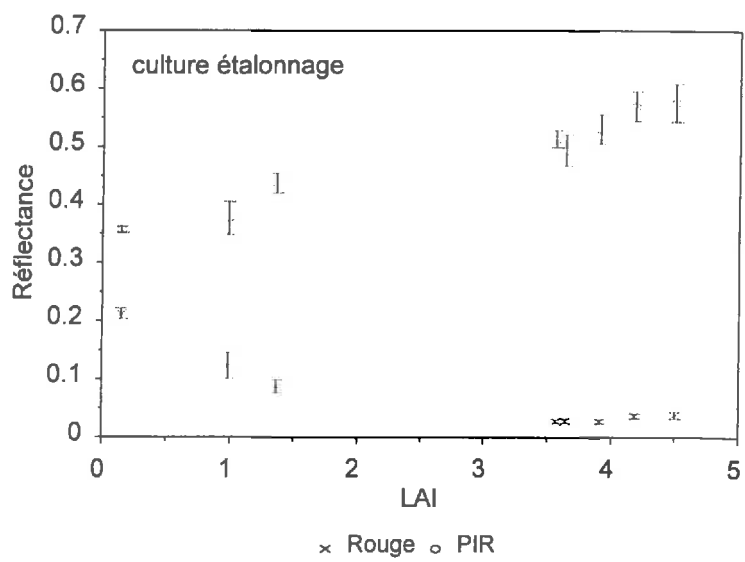


Figure 3-14. Réflectance de la culture en fonction de LAI.

surface-réflectance du sol, acquise indépendamment sur le même sol, pour déterminer la réflectance du sol.

On a donc réalisé, sur une surface de sol dégagée, à différents moments au cours de la saison et à différentes humidité, des mesures de réflectance du sol associées à des mesures d'humidité de surface des 2 premiers mm (par la méthode gravimétrique).

La décroissance de la réflectance du sol en fonction de l'humidité de surface a été décrite dans chaque bande spectrale par une loi exponentielle:

$$\rho = \rho_{\min} + (\rho_{\max} - \rho_{\min})e^{-\alpha H}$$

Eq. 3-18

où ρ est la réflectance spectrale du sol, ρ_{\min} et ρ_{\max} sont les réflectances minimale et maximale calculées, α est un coefficient d'ajustement de la courbe, et H est l'humidité de surface du sol mesurée, en pour cent. La relation, et ces coefficients, sont montrés dans la Figure 3-15.

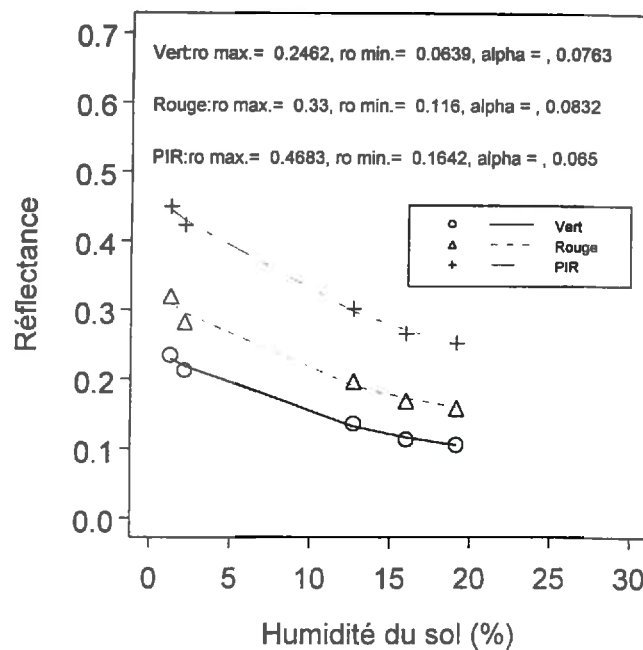


Figure 3-15. Relations humidité de surface-réflectance du sol et paramètres (Eq. 3-18) pour les 3 bandes spectrales.

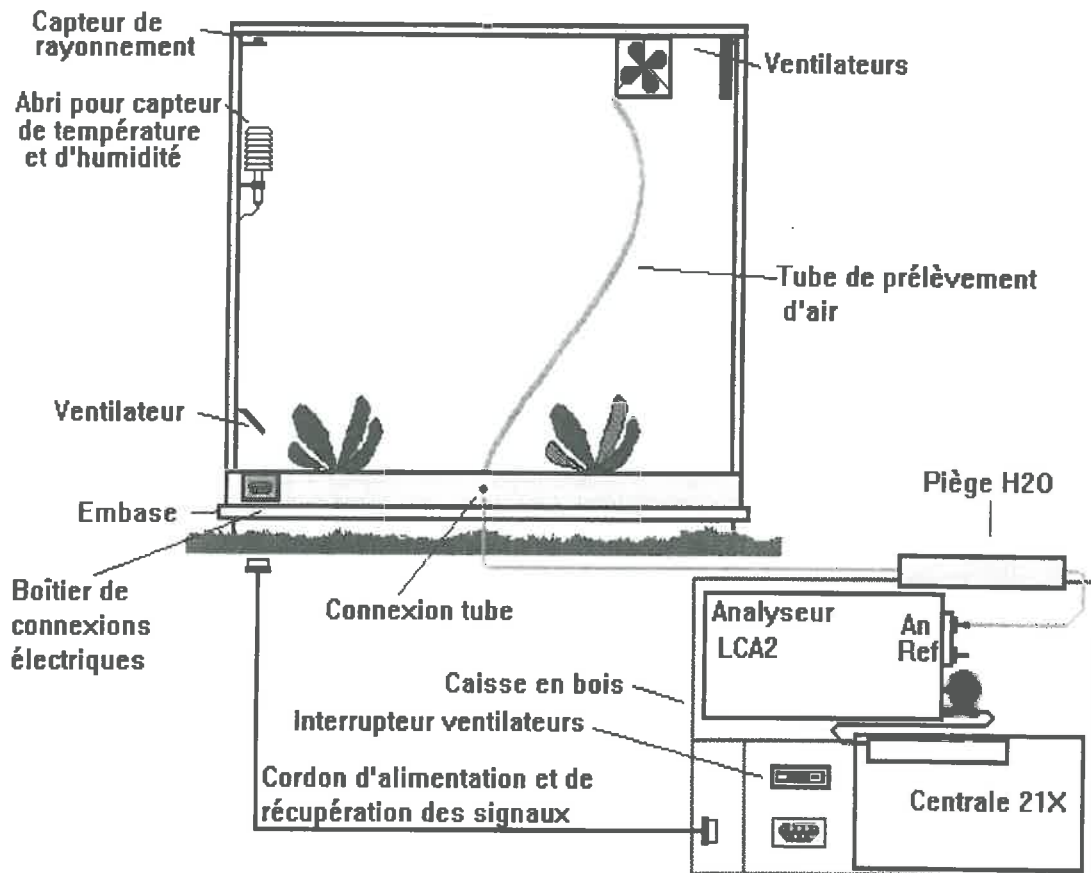


Figure 3-16. Système de mesure de la photosynthèse nette au niveau du couvert.

3.1.4.6 Photosynthèse

Nous avons réalisé des mesures du taux de photosynthèse nette au niveau du couvert quatre fois dans la saison (J175, J205, J215, J216).

Principe de la mesure:

Cela consiste à mesurer la diminution de la teneur de CO₂ de l'air à l'intérieur d'une enceinte fermée disposée sur des plantes pendant trois minutes. Ce système a été développé à la station (Dekervel, 1994) à partir des prototypes réalisés à Avignon (Brisson *et al.*, 1992 a). L'enceinte, cubique, a une surface au sol de 1m² et une hauteur adaptée à l'évolution de la hauteur du couvert (0.48m pour le premier jour des mesures et 0.8m pour les suivants) (Figure 3-16). Elle est faite d'une armature en aluminium recouverte d'un film de polypropylène, étanche aux gaz, transparent au PAR. Elle est ventilée et équipée de capteurs de PAR incident, de température et d'humidité relative de l'air. L'étanchéité du système au niveau du sol est assurée par une embase en PVC insérée dans le sol jusqu'à une profondeur de 8cm et dont la partie supérieure, en forme de gouttière est remplie d'eau (l'eau assurant un joint étanche). Un capillaire percé traverse l'enceinte et prélève un petit échantillon d'air grâce à une pompe d'un débit de 150.ml.min⁻¹. L'air est dirigé vers un analyseur de CO₂ à infrarouge. Une acquisition de données enregistre la concentration de CO₂ mesurée (en ppm), le PAR incident, la température, et l'humidité dans l'enceinte avec un pas de temps de 5 secondes.

Le taux de photosynthèse nette (Pn), ou l'assimilation de CO₂, exprimé en quantité de CO₂ assimilée par unité de surface du sol et de temps (μmole.m⁻².s⁻¹), est calculée par le taux de diminution de la teneur en CO₂ de l'air. Le taux d'assimilation dans un système fermé peut-être exprimé par l'équation suivante (Long et Hällgren, 1985) :

$$Pn = ((C1-C2)/(t2-t1) \times 10^3) \cdot (V/22.4) \cdot (P/101.325) \cdot \{273.13/(T \cdot S)\}$$

Eq. 3-19

- Pn photosynthèse nette (μmole.m⁻².s⁻¹);
- C1,C2 fractions molaires de CO₂ aux temps t1 et t2 (μmole CO₂.mole d'air⁻¹);
- 22.4 volume d'une mole de CO₂ à la température (273.13°K) et la pression (101.325kPa) "standard" (ml);
- S surface de la placette (m²);
- V volume total du système (ml);
- T température de l'air (°K); et
- P pression atmosphérique (kPa).

L'Eq. 3-19 se simplifie en substituant V par S×h, où h est la hauteur de l'enceinte, en mètres. Dans la pratique, l'effet de la pression est négligé, ce qui revient à effectuer les mesures de teneur en CO₂ de l'air et de la température ambiante (sans correction par rapport aux conditions "standard") pour estimer la Pn (Dekervel, 1994). L'équation devient alors :

$$Pn = ((C1-C2)/(t2-t1) \times 10^3) \cdot (h/22.4) \cdot (273.13/T)$$

Eq. 3-20

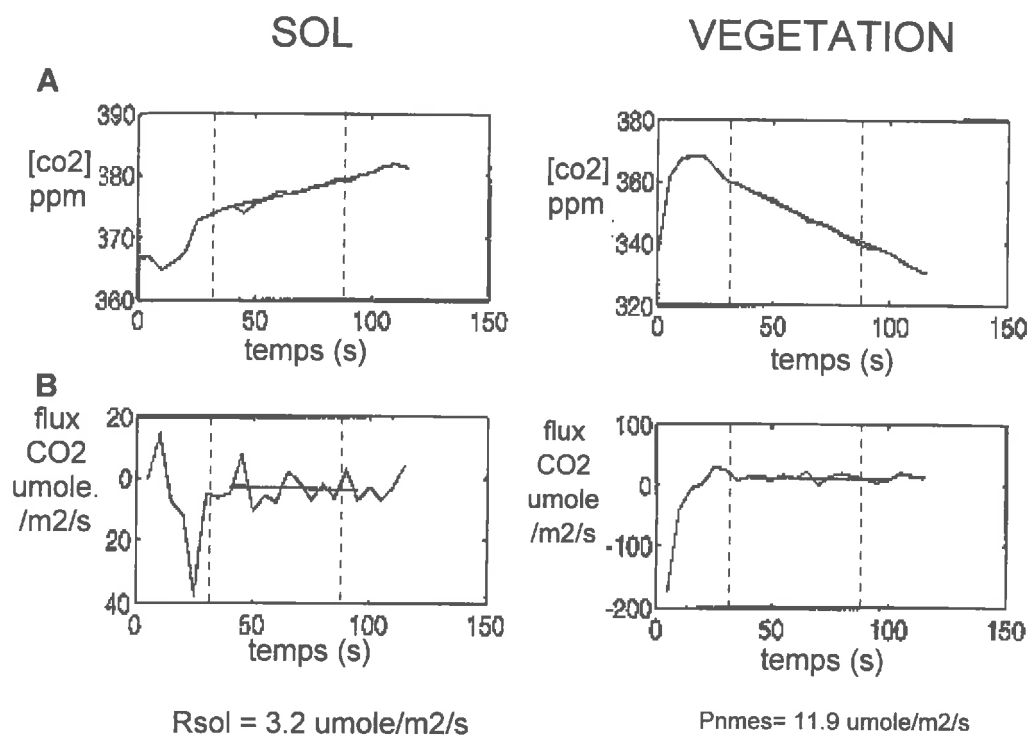


Figure 3-17. A) Évolution de la teneur en CO₂ dans l'enceinte et B) calcul des flux de photosynthèse et de respiration (sol nu).

Pendant la durée de la mesure, le sol dégage du CO₂ sous l'effet de l'activité microbienne. La mesure (P_{mes}) doit donc être corrigée de cette respiration (R_{sol}). Pour avoir une estimation de ce flux, on réalise des mesures sur une placette dont on a arraché les plantes : on observe alors non plus une diminution mais une augmentation de la teneur en CO₂ au cours du temps.

Le calcul des taux de photosynthèse et de respiration du sol ont été faits grâce à un logiciel écrit pour le dépouillement des fichiers de l'acquisition de données (Brisson, modifié par Guérif, pers. comm.). Sur la courbe de décroissance de la teneur en CO₂ (Figure 3-17), on sélectionne interactivement l'intervalle de temps pendant lequel est fait le calcul, en tenant compte en particulier du temps de réponse du système (environ 30s) lié au volume mort (tuyaux + pièges à humidité). Sur l'ensemble des points de mesure sélectionnés, une valeur moyenne de P_n est calculée à partir des valeurs obtenues sur chaque couple de points successifs. Le taux de respiration du sol est estimé de façon identique.

Le taux de photosynthèse nette des plantes est alors estimé par la somme du taux mesuré (P_{mes}) et du taux de respiration du "sol" (P_{sol}):

$$P_n = P_{mes} + R_{sol}$$

Eq. 3-21

Protocole de mesure.

Les dates des mesures sont 24/06/94, 22/07/94, 3/08/94 et le 4/08/94 (les jours juliens J175, J203, J215, J216). Les mesures ont été faites pendant les belles journées, sur 2 emplacements en commençant tôt le matin jusqu'au midi solaire (au total, 10 à 19 mesures étaient réalisées sur chaque répétition). Les emplacements de mesure étaient arrosés le jour précédent ou le matin au début des mesures. Le LAI de chaque placette a été déterminé en fin de périodes de mesures.

La respiration du sol a été mesurée environ toutes les demi-heures de la même façon que sur les plantes. Les caractéristiques des mesures sont récapitulées dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5. Configuration générale des jours des mesures de photosynthèse nette.

Jour	Répétitions	Nombre mesures (plantes/sol)	Mes. début/fin (heure locale)	LAI	Age en Σ Temp. (base 2°C)	Température diurne (min/max)
175	1Plante/1Sol	10/11	8:38-14:08	2.93	615.	13.4, 30.0
203	2Plante/1Sol	11/11/5	8:35-12:48	3.09/3.50	939.	15.7, 30.4
215	2Plante/1Sol	14/13/6	6:18-14:07	3.37/3.08	1370.	15.5, 31.0
216	2Plante/1Sol	19/18/8	6:31-14:27	3.37/3.08	1390.	17.7, 34.9

Avant chaque mesure, l'enceinte était aérée pour ramener la teneur en CO₂ et la température de l'air au niveau de ceux de l'air ambiant. Un effet de serre fait que la température augmente rapidement pendant la mesure de 3 minutes (de l'ordre de 1-3°C). La Figure 3-18 et la Figure 3-19 montrent l'évolution des températures et du PAR incident. On voit que les jours 175 et 215 étaient bien ensoleillés et les jours 203 et 216 avaient plusieurs passages nuageux.

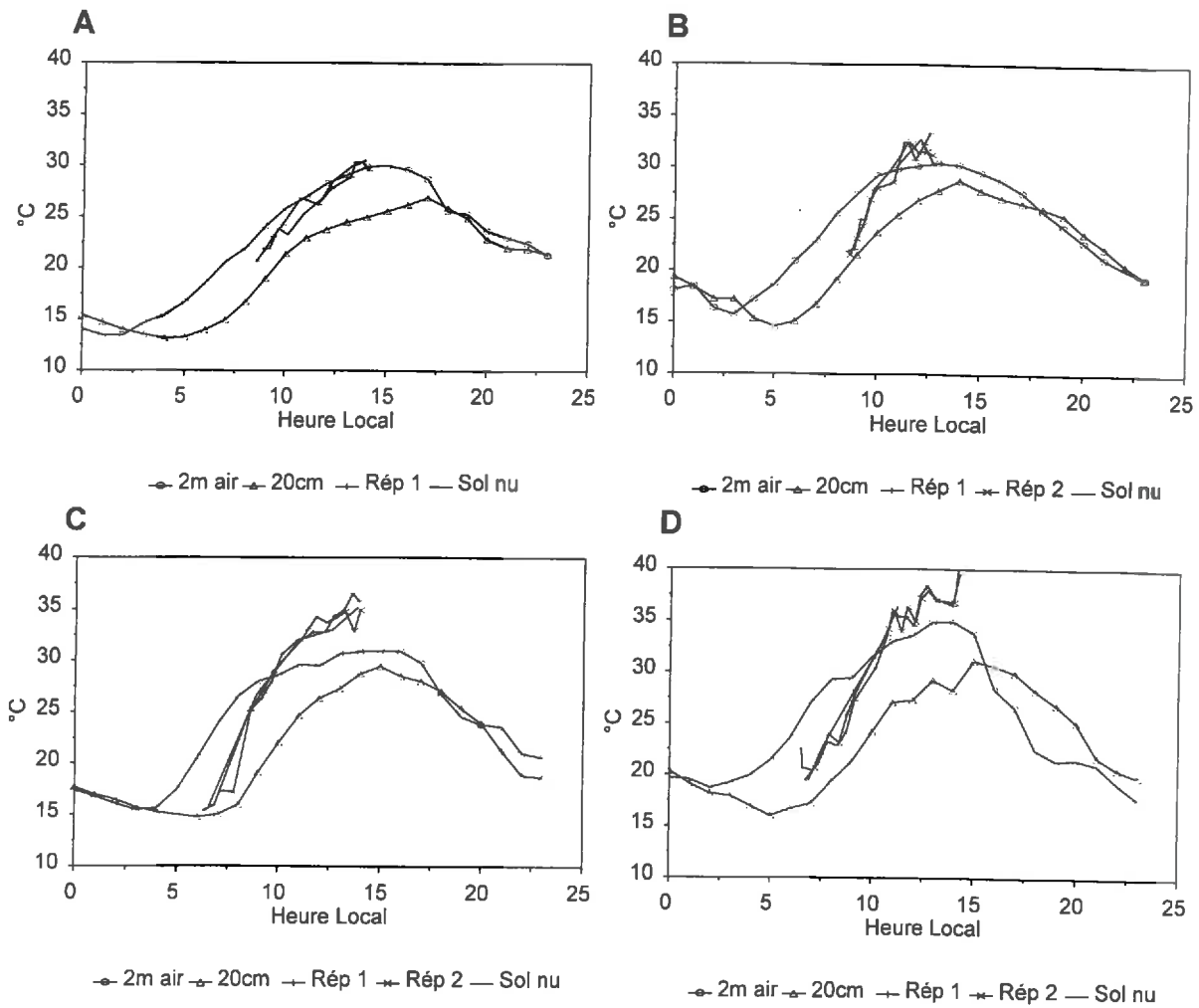


Figure 3-18. Comparaison des températures pour les 4 jours de mesure de la photosynthèse: dans l'enceinte, sur végétation (rep1, 2) ou sol nu (sol nu); à l'extérieur, à 2m au dessus du couvert (2m air) et à 20cm dans le couvert (20cm).

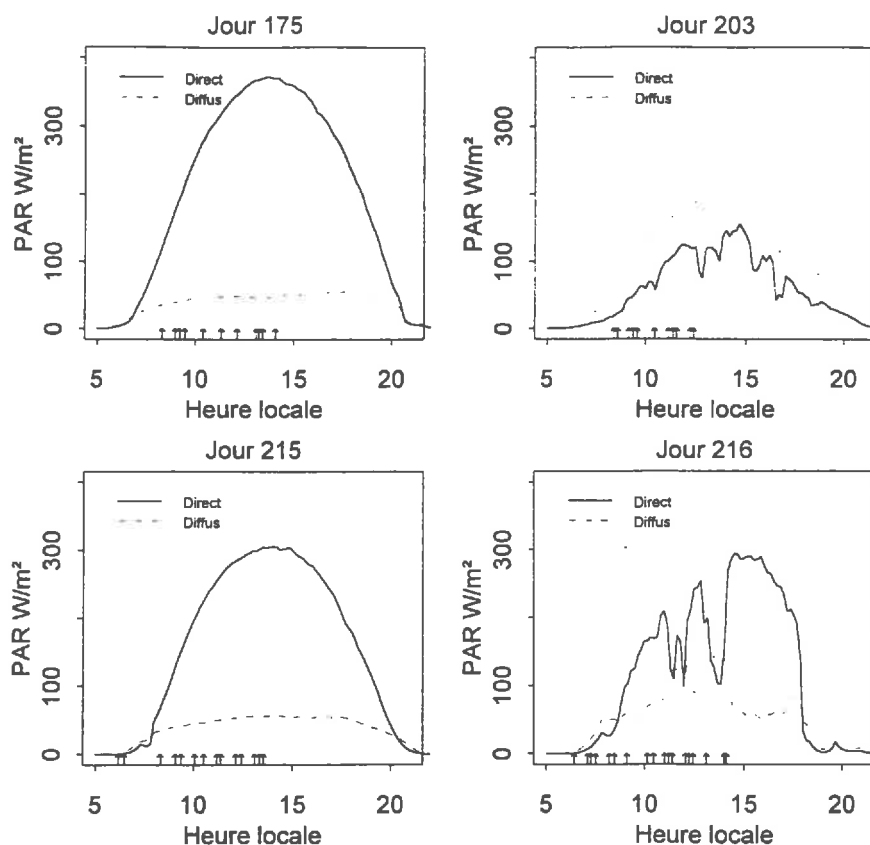


Figure 3-19. PAR incident mesuré à l'extérieur de l'enceinte et (↑) moments des mesures de la photosynthèse pour les 4 jours de mesure.

Estimation de la photosynthèse brute Pb.

La Pb est la somme de photosynthèse nette (Pn) du couvert (obtenue à partir des mesures par Eq. 3-21), de la respiration de croissance (Rc) et de la respiration de maintenance des plantes (Rm):

$$Pn = Pb - (Rm + Rc)$$

Eq. 3-22

Les mesures de respiration sont très difficiles à réaliser précisément au champ (cf. revus d'Amthor, 1984 et Ruget, 1981). Nous avons donc utilisé les fonctions de SUCROS pour estimer ces coûts de respiration.

La respiration de maintenance (Rm; en $\text{kg}(\text{CH}_2\text{O})\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$) y est modélisée par des coefficients de respiration pour chaque organe à une température de référence par:

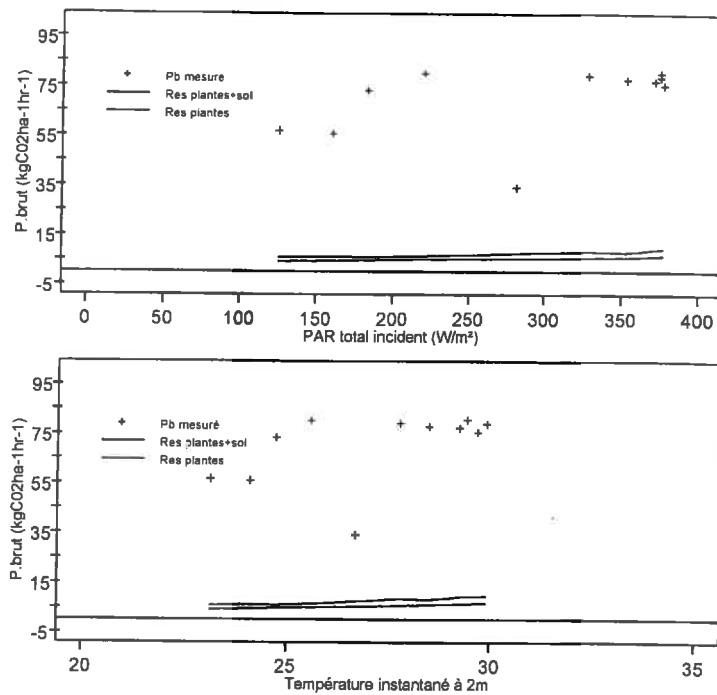
$$Rm = T_{eff} (0.03 \cdot MS_{\text{limbes}} + 0.015 \cdot MS_{\text{pétioles}} + 0.015 \cdot MS_{\text{racineF}} + 0.003 \cdot MS_{\text{racineS}})$$

Eq. 3-23

où les masses sèches (M.S.) des organes verts (limbes, pétioles, racines fibreuses, et racine de stockage respectivement) sont exprimées en kg ha^{-1} de matière sèche et les coefficients de maintenance sont exprimés en $\text{kg CH}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$ pour une température de référence de 25°C . Le coût total de maintenance est multiplié par un facteur T_{eff} qui exprime la dépendance entre la respiration et la température (avec un Q10 de 2).

La respiration de croissance R_c est modélisée par des efficacités de croissance appliquées aux quantités d'assimilats disponibles pour la croissance de chaque organe, c'est à dire le produit de la

Jour 175



Jour 216

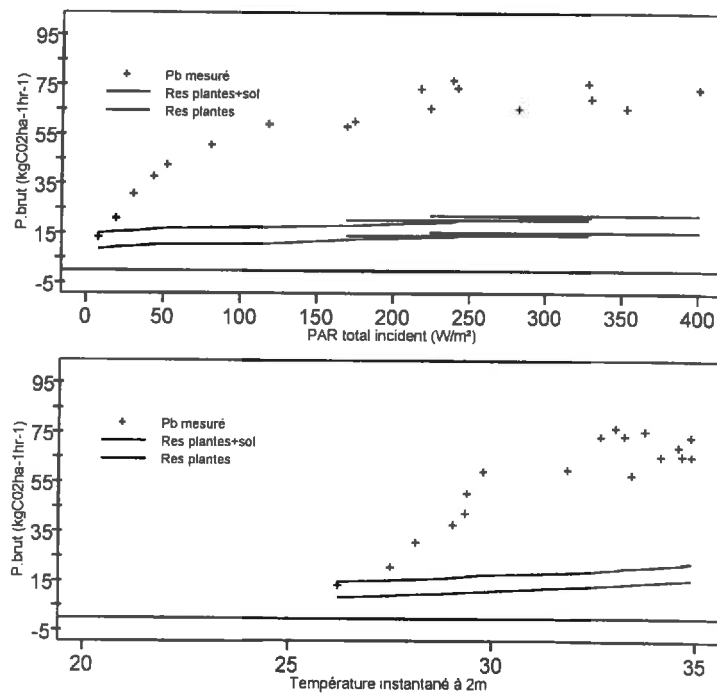


Figure 3-20. Photosynthèse brute estimée pour 2 jours de mesure, en introduisant la respiration des plantes et du sol, en fonction du PAR incident et de la température instantanée à 2m.

Tableau 3-6. Caractérisation des lits de semences.

Conditions de semis	Culture étalonnage	Culture test
Granulométrie du lit de semences (% pondéral)		
terre fine (< 1mm)	18.0	12.0
mottes (> 20mm)	8.0	20.0
Profondeur moyenne des semences (cm)	2.7	4.6

quantité totale d'assimilats disponibles $Assim$ (en $\text{kg}(\text{CH}_2\text{O})\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$) multipliée par les fonctions de répartition aux différents organes F_i :

$$R_c = Assim \cdot \sum_i F_i \cdot C_i$$

Eq. 3-24

Les coefficients C_i sont des coûts de conversion de CH_2O en matière sèche (exprimés en $\text{kgCH}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$) spécifiques à chaque organe, selon sa composition biochimique ($C_{\text{limbes}} = 1.46$, $C_{\text{pétioles}} = C_{\text{collets}} = 1.51$, $C_{\text{racineF}} = 1.44$, $C_{\text{pivot}} = 1.29$).

Nous avons fait ces calculs de respiration au pas de temps instantané à partir des formulations journalières données dans SUCROS. Nous avons considéré que la respiration de croissance était répartie uniformément sur la journée et que la respiration d'entretien était fonction de la température instantanée.

La Figure 3-20 montre un exemple d'évolution de taux de la photosynthèse brute de la culture mesurée (exprimée dans les mêmes unités que dans SUCROS: $\text{kgCO}_2\cdot\text{ha}(\text{feuille})^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) en fonction du PAR incident (PAR en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) pour deux jours de mesures (J175, LAI=2.93; J216, LAI=3.08). Les autres répétitions et des autres jours (J203 et J215) étaient similaires. Il y a trois courbes illustrées sur chaque graphique. Les deux courbes inférieures représentent la respiration calculée des plantes et la somme (respiration des plantes + respiration du sol). Elles sont assez stables au cours des quatre journées, mais, pour les jours 215 et 216, elles sont plus élevées que pour les deux premiers jours. Les fortes températures pourraient expliquer une augmentation de la respiration du sol et de la respiration de maintenance des plantes. La courbe supérieure (+) est la P_b estimée à partir des mesures de P_n et des respirations plantes et sol calculées et mesurées.

On retrouve bien l'évolution classique de P_b en fonction du PAR incident. La P_b croît rapidement pour les faibles niveaux de PAR incident, et arrive à un plateau aux environs de $200\text{-}250\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ pour atteindre des valeurs maximums de $75\text{-}80 \text{kg}(\text{CH}_2\text{O})\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$.

3.2 Données acquises pour le test du modèle couplé

Nous avons créé une situation expérimentale où les conditions de la levée ont été perturbées de façon à produire des résultats en terme de levée et de croissance juvénile très différents de ceux obtenus dans la situation utilisée pour l'étalonnage. Dans cette situation, les paramètres standard décrivant l'implantation dans le modèle SUCROS sont véritablement mis en défaut.

Cette situation, que l'on appellera dans la suite culture test, a été réalisée sur la même parcelle que la situation ayant permis d'obtenir les mesures pour l'étalonnage des modèles, que l'on appellera culture d'étalonnage (même variété et date de semis). Seules les interventions de préparation du lit de semence et de semis ont été différenciées. Comme pour la situation de référence, on a maintenu par la suite des conditions de croissance optimales sans stress hydrique ou minéral, et sans problème pathologique.

Cette situation expérimentale a fait l'objet, comme la parcelle d'étalonnage, de suivi de levée, de mesures de croissance et de réflectance. Les mesures de croissance mature et de réflectance ont été réalisées avec une fréquence plus faible que la culture d'étalonnage. Les dates d'intervention sont notées dans le Tableau 3-6.

3.2.1 Création des conditions de la situation test

3.2.1.1 Choix des techniques d'implantation

On a joué sur les 2 interventions: reprise du labour et semis.

- Reprise du labour: Le labour (du mois d'août 93) était déjà bien dégradé, sans grosses mottes, sous l'action des alternances de pluies de l'hiver. On a cherché à réaliser une préparation plus grossière que dans la parcelle d'étalonnage, de manière à laisser des mottes assez importantes qui pourraient constituer des obstacles pour les plantules. Pour cela, on a fait un passage d'outil (Précillitor) à vitesse lente, pour ne pas trop briser les mottes, sans barre niveleuse.
- Semis: Le réglage du semoir a été fait pour obtenir une profondeur de semis plus grande; le chasse-mottes (qui a pour objectif d'écarter les mottes de la ligne de semis) a été retiré pour que les mottes constituent effectivement des obstacles pour les plantules.

3.2.1.2 Résultats

Les caractéristiques du lit de semences ont bien été modifiées comme en témoignent les mesures de taille d'agrégats et les observations de placement des semences figurées dans le Tableau 3-7. La fréquence des mottes de diamètre supérieur à 20mm a été augmentée aux dépends de la terre fine ainsi que la profondeur moyenne du placement des semences.

Tableau 3-7. Récapitulation des interventions sur la culture test.

Jour	Prélèvement	Réfectancemètre ¹	Traitement	ΣTemp. depuis la levée (base3°/2°C)
108			Semis	0/0
110			Herbicide	0/0
129			Herbicide	50./55.
130	1			58./64.
136	2			128./140.
138			Herbicide	154./168.
139	3		Binage	165./180.
144	4			217./237.
147	5			252./275.
151	6	T		283./310.
157			Bore	350./383.
163		T		406./445.
165	7			429./470.
167		T		455./498.
173			Irrigation	534./582.
178			Insecticide-Fongicide	612./665.
179	8	T		626./679.
186			Irrigation	749./805.
198			Phyosanitaire	941./1002.
201			Irrigation	997./1058.
205		T		1076./1134.
206	9			1098./1153.
208			Irrigation	1140./1191.
219				1360./1399.
256	10			1864./1938.
265			Récolté	

note: 1 T = Mesures de la télédétection sur la culture test.

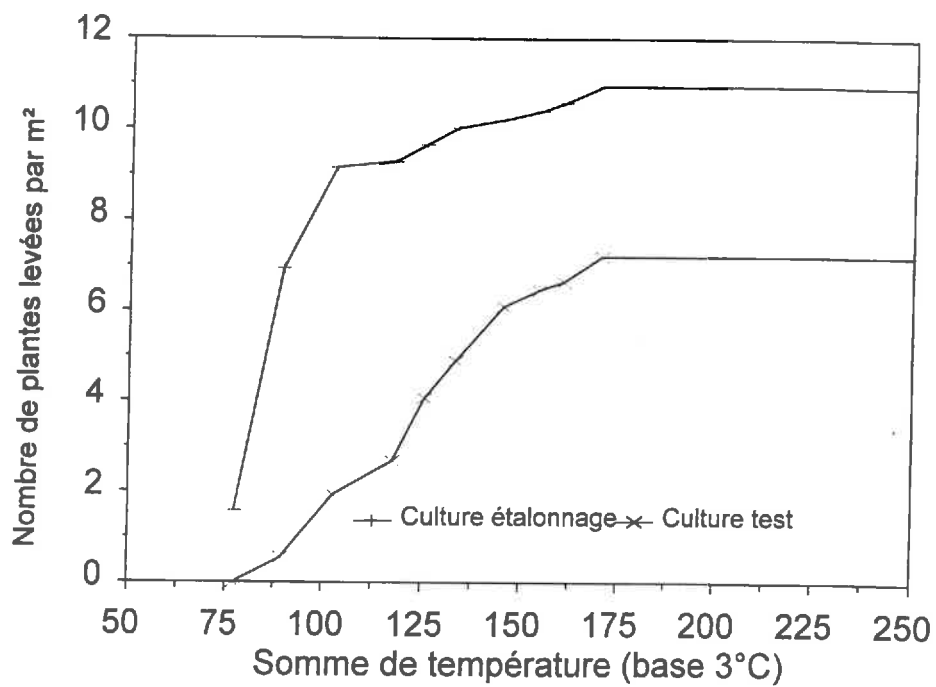


Figure 3-21. Cinétiques de levée des cultures étalonnage et test en fonction de la somme de température depuis le semis.

3.2.2 Les mesures

3.2.2.1 La levée

Les interventions techniques appliquées ont bien pénalisé les modalités de la levée: vitesse de levée mais surtout taux final de levée.

La courbe des levées cumulées Figure 3-21 montre une vitesse de levée inférieure à celle de la culture d'étalonnage. Un comptage deux semaines après 175°C·jours n'a montré aucun changement du nombre des plantes levées, confirmant que les plantules non levées après 175°C·jours ont peu de chance de continuer de survivre. La somme de température à 80% de la levée finale, que nous avons prise comme définition de la somme de température moyenne nécessaire à la levée, est de 128°C·jours, et donc plus tardive que celle de la culture d'étalonnage (103°C·jours). Le nombre final de plantes levées est de 6.7 plantes par m² (au lieu de 10.8 plantes·m² pour la culture d'étalonnage), ce qui constitue une réduction importante de la densité de peuplement.

3.2.2.2. Les mesures de croissance

Le suivi du LAI illustre le décalage provoqué par la réalisation de la phase d'installation du couvert (Figure 3-22). A 500°C·jours, la culture d'étalonnage est à LAI=0.75, alors que la culture test n'est qu'à LAI=0.5. Ce décalage de la courbe de LAI se poursuit et si la culture test parvient bien à rattraper le niveau de LAI de la culture d'étalonnage, elle ne le fait que plus tard. Ce décalage de LAI se traduit par un déficit d'interception de PAR et de production de biomasse qui se répercute sur les masses des différents organes (Figure 3-23).

Les masses finales des pétioles et des feuilles vertes sont inférieures d'environ 1000kg/ha à celles de la culture d'étalonnage. Les masses finales des racines de stockage (pivots) sont inférieures d'environ 4000kg/ha, ce qui représente une réduction du rendement d'environ 20%.

3.2.2.3 Les mesures de réflectance:

La réflectance du couvert a été mesurée 5 fois pendant la saison, essentiellement pendant la croissance précoce (avec des LAI inférieurs à 2), de façon à simuler des conditions opérationnelles d'acquisition de données de télédétection. Les réflectances dans le rouge et dans le PIR sont présentées en fonction du LAI à la Figure 3-24. La réflectance de la culture d'étalonnage a été ajoutée pour comparaison avec la culture test. On note que les points de ces cultures sont proches, exprimant le fait qu'il n'y a pas de différence notable dans la relation réflectance-LAI. Pour autant qu'on puisse en juger globalement, les réflectances de sol, les propriétés optiques et la structure du couvert des 2 cultures sont très semblables.

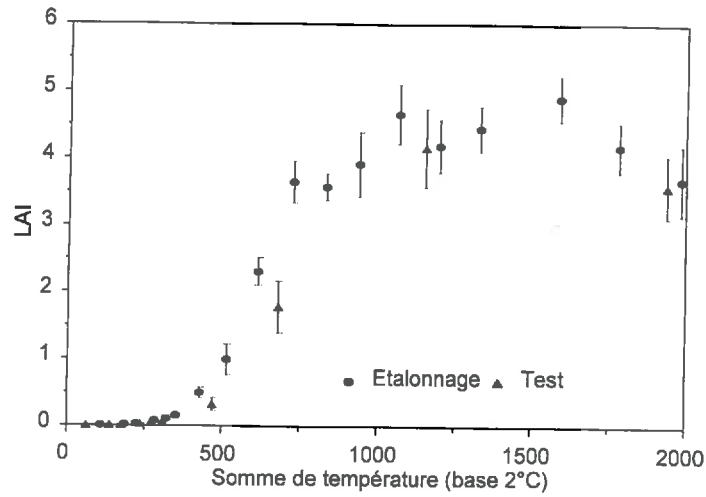


Figure 3-22. Évolution du LAI de la culture test. Comparaison avec celui de la culture d'étalonnage.

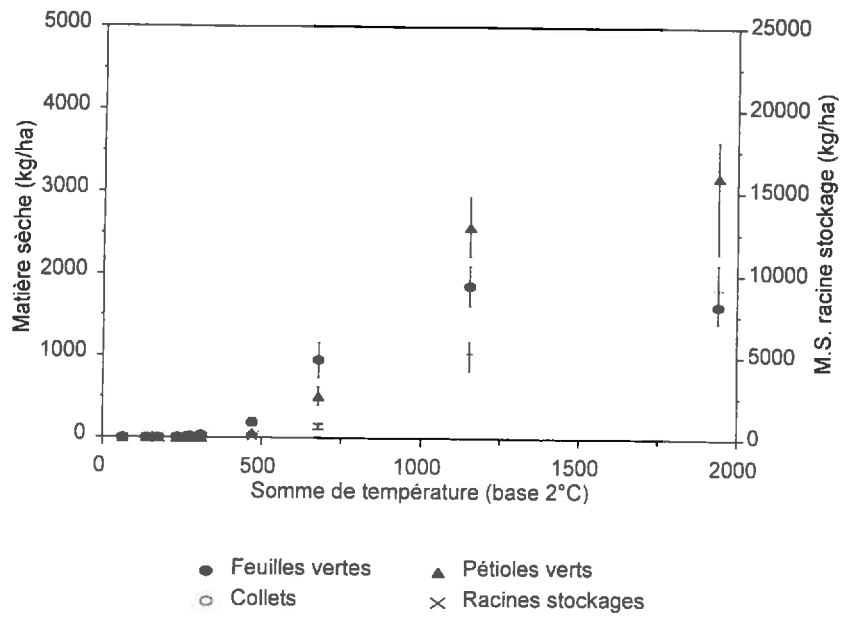


Figure 3-23. Masses des différents organes de la culture test.

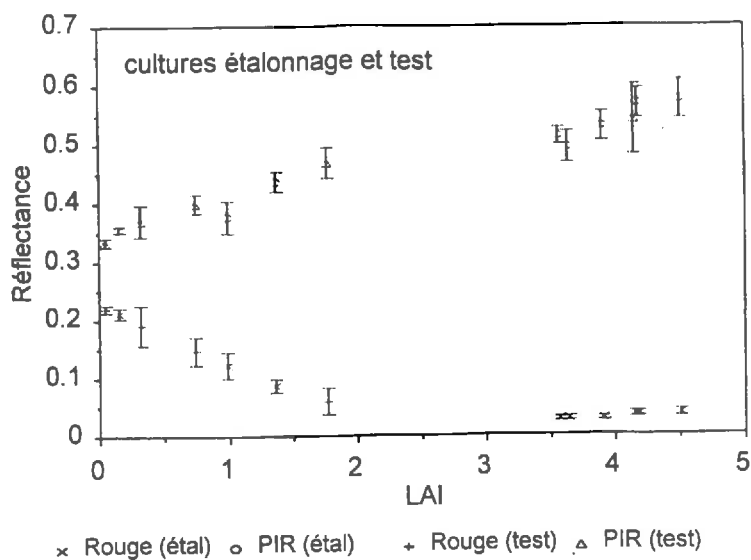


Figure 3-24. Mesures de la réflectance rouge et proche infrarouge sur la culture test. Comparaison avec celles réalisées sur la culture d'étalonnage

En bilan, on constate que la culture test a eu une croissance assez différente de la situation sur laquelle le modèle SUCROS a été étalonné. Les différences sont imputables aux différences de conditions d'implantation, toutes les autres conditions étant par ailleurs égales. Ce jeu de données permettra de tester un véritable réétalonnage de SUCROS couplé avec SAIL qui sera nécessaire pour simuler correctement la croissance de cette culture.

3.3 Variabilité spatio-temporelle des paramètres de SAIL

Au delà des situations expérimentales créées pour l'étalonnage des modèles SUCROS et SAIL et le premier test du modèle couplé, la méthodologie d'assimilation de données de télédétection en cours d'élaboration est destinée à être appliquée sur des domaines d'espace larges, représentatifs de bassins d'alimentation de sucreries. À cette échelle d'espace, contrairement à la situation expérimentale où tous les facteurs sont contrôlables (sinon contrôlés), il existe une grande variabilité des conditions de culture. Cette variabilité va se répercuter non seulement sur la croissance des cultures, ce que nous cherchons à mesurer, mais elle se traduit également par des variations de certaines caractéristiques du sol et des plantes. À cette variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle: les caractéristiques sol et plante en un lieu donné évoluent en fonction du temps, sous l'effet de l'évolution physiologique de la culture et celle de l'état physique du sol. Or, ces caractéristiques interviennent dans le modèle de réflectance et influencent le processus d'estimation de la réflectance et donc de correction du modèle. Il n'est pas envisageable de connaître pour chaque point de l'espace ces caractéristiques, mais pour réduire les erreurs liées à leur méconnaissance, il est possible de les estimer à partir d'une analyse préalable des sources de variabilité et des distributions de valeurs rencontrées à ces échelles (voir plus loin, Chapitre 5). C'est cette analyse que nous avons essayé de faire, à partir d'observations faites soit directement à cette échelle, soit en situation expérimentale où l'on a fait varier les facteurs dans une gamme comparable à celle rencontrée à l'échelle d'une petite région.

Nous nous sommes attachés à deux types de caractéristiques qui constituent des paramètres du modèle SAIL:

- pour le sol: sa réflectance
- pour la culture: ses propriétés optiques et sa structure (angle foliaire moyen).

3.3.1 Variabilité de la réflectance du sol

3.3.1.1 Les sites étudiés

Une campagne d'acquisition de données à l'échelle de bassins sucriers a été réalisée pendant la saison de 1995 pour la validation de la méthode d'estimation des rendements par assimilation de données de télédétection par le modèle couplé SUCROS+SAIL. Elle a comporté des acquisitions de données aéroportées et satellitaires, et un ensemble de mesures de contrôle au sol. Cette campagne de mesure n'a pas été exploitée dans le cadre de cette thèse: nous nous bornerons ici à utiliser les mesures de caractérisation des sols qui ont été faites à cette occasion pour illustrer la variabilité que l'on rencontre à l'échelle régionale.

Deux sites d'études ont été retenus qui satisfont aux hypothèses de conditions de culture optimales: sols avec une forte réserve utile, absence de problèmes sanitaires (rhizomanie, nématodes, rhizoctone), zones à relief faible ou nul. Pour pouvoir créer des situations où l'implantation serait assez contrastée, nous avons cherché à préserver une assez grande variété de sols (sols crayeux en

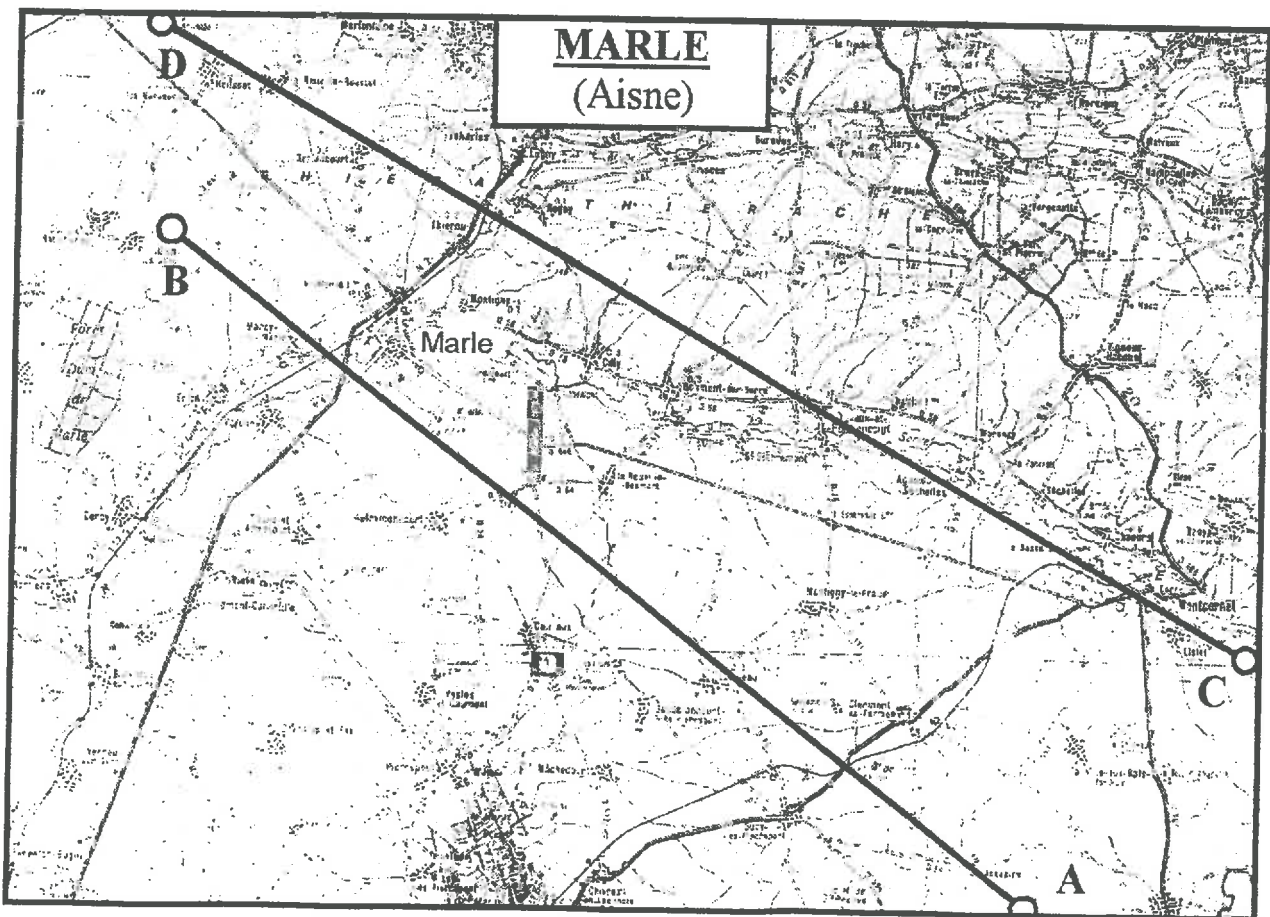
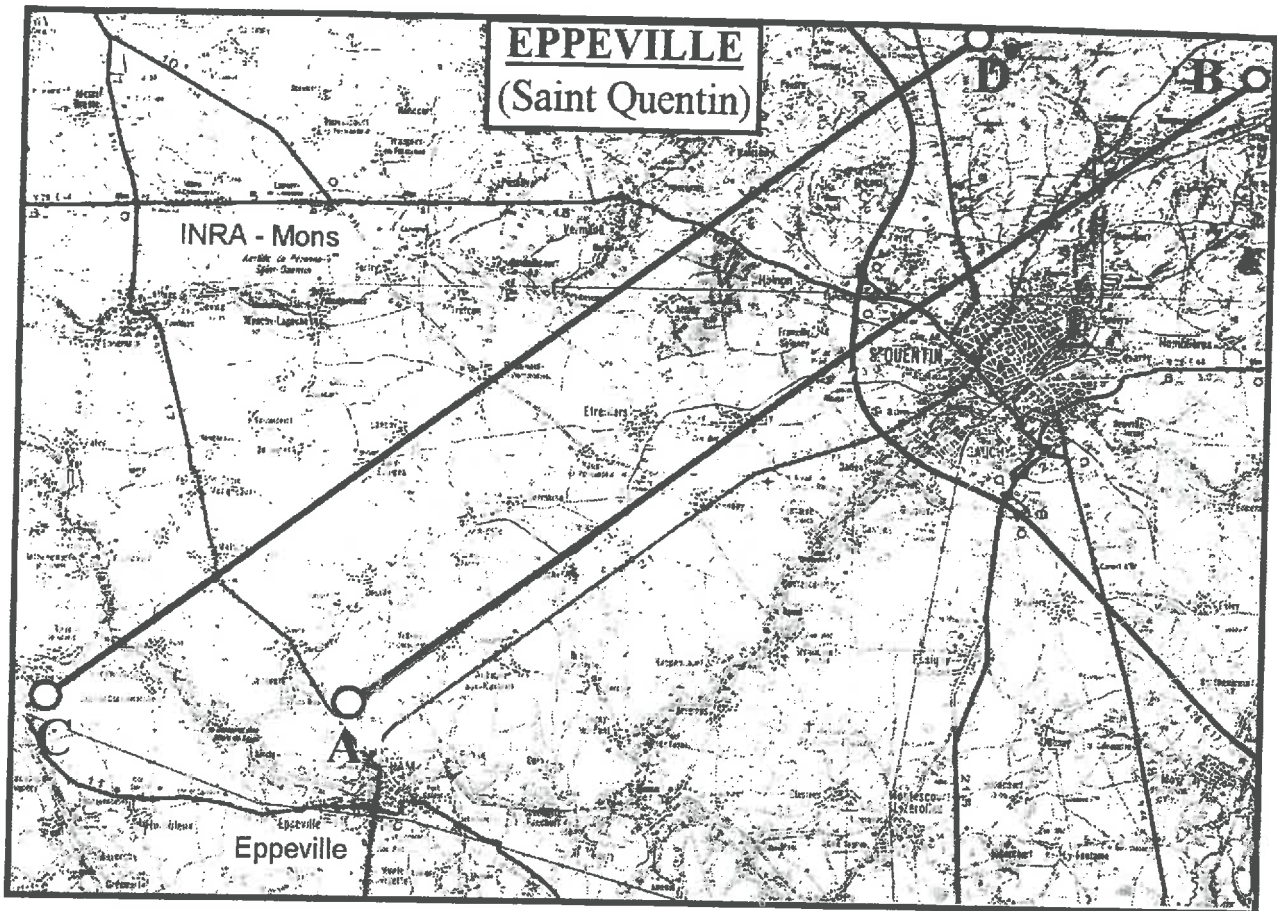


Figure 3-25. Les deux sites d'études autour des sucéreries de Eppeville et Marle. Les traits représentent les axes de vol pour l'acquisition des mesures de réflectance.

particulier, réputés à réchauffement plus lent). Enfin, il était important d'avoir des sites où les parcelles sont assez grandes pour être représentées par plusieurs pixels SPOT (ce qui n'est pas vraiment un problème en Picardie).

Les deux sites retenus, correspondant chacun à deux axes de 5x30 km sont montrés dans la Figure 3-25. Le site d'Eppeville, près de St. Quentin et celui de Marle. Vingt deux parcelles ont été sélectionnées dans le bassin de la sucrerie d'Eppeville et 27 dans celui de la sucrerie de Marle.

Cette campagne d'acquisition des données a été faite en collaboration avec l'Institut Technique de la Betterave (I.T.B.) les deux sucreries Générale Sucrière d'Eppeville et C.F.S. de Marle, avec le soutien du Programme National de Télédétection Spatiale (P.N.T.S.) et du Centre Nationale des Etudes Spatiale (C.N.E.S.) pour les acquisitions d'images (qui ne seront pas exploitées dans ce travail).

3.3.1.2 Les facteurs de variabilité

Comme nous l'avons vu au Chapitre 2, la réflectance du sol varie essentiellement en fonction de 3 facteurs:

- **le type de sol** (composition minéralogique), qui est le résultat de la pédogenèse et peut être renseigné par des cartes pédologiques. C'est bien sûr le facteur qui confère sa dimension spatiale à la variabilité de la réflectance des sols. Par ailleurs, plusieurs types de sol coexistent souvent dans la même parcelle, essentiellement associés à la topographie (et même si cette hétérogénéité doit pouvoir être prise en compte par des logiciels de type SIG, elle complique la prise de mesures au sol).
- **la rugosité**, qui dépend essentiellement des opérations de travail du sol et de l'effet des pluies. Pour un champ de betterave, elle évolue lentement au début de la culture entre celle d'un lit de semences frais et celle d'un lit de semence dégradé par l'action des pluies (rugosités faibles dans les 2 cas). Elle peut être fortement augmentée par l'action du binage qui intervient à peu près au moment où les plantes commencent à se recouvrir sur le rang et où les inter-rangs sont encore bien dégagés (cela correspond à peu près au stade LAI=0.75 de SUCROS). Ce facteur joue à la fois sur la dimension spatiale (décisions des agriculteurs de biner ou pas) et temporelle (évolution de la rugosité sous l'action du climat, intervention ponctuelle du binage à un certain stade) de la variabilité.
- **l'humidité de surface** (5 premiers mm): pour un sol donné, elle varie bien sûr au cours du temps en fonction du régime de pluies et d'évaporation. Ce facteur joue essentiellement sur la dimension temporelle de la variabilité.

3.3.1.3 Les types de sol

Le site d'Eppeville est presque entièrement situé dans la portion Nord-Est du vaste plateau du Santerre, dont elle est séparée par la vallée tourbeuse de la Somme. C'est un plateau dont l'altitude varie de 80 à 120 mètres, constitué par la craie sénonienne et recouvert d'un dépôt de limon loessique épais de 3 à 6 mètres. Ces sols qui se développent sur les limons sont du type sol brun lessivé. Du fait de l'érosion, les horizons éluviaux aux textures de limon moyen (LM), de couleur claire, sont peu épais,

Tableau 3-8. Types de sol des sites de Epeville et Marle, avec les paramètres des droites du sol (Eq 3-25) avec (1) ou sans (0) binage.

Site	Type du sol	Code	Binage	Pente de régression (α)	Ordonnée à l'origine (β)
Epeville					
ep	limon moyen	lmbiz1	1	1.2823	0.0378
ep	limon moyen	lmbz1	0	1.2672	0.0534
ep	colluvium	cobiz2	1	1.2803	0.0505
ep	colluvium	conbz2	0	1.3166	0.0494
ep	limon argileux	labiz1	1	1.0525	0.0714
ep	limon argileux	lanbz1	0	1.2143	0.0539
ep	limon argileux	labiz2	1	1.1140	0.0584
ep	limon argileux	lanbz2	0	1.2265	0.0751
ep	limon argileux	labiz3	1	1.1636	0.0485
ep	limon argileux	lanbz3	0	1.2631	0.0585
ep	craie blanche	cbbic1	1	1.0791	0.0669
ep	craie blanche	cbnbc1	0	1.0573	0.0805
ep	craie + limon	ccbic2	1	1.0697	0.0617
ep	craie + limon	ccnbc2	0	1.1793	0.0549
ep	craie + limon	cpbic3	1	1.2233	0.0358
ep	craie + limon	cpnbc3	0	1.0268	0.1006
ep	craie grise	cgbic4	1	0.9376	0.1057
ep	craie grise	cgnbc4	0	1.0365	0.0912
ep	limon organique	orbiz1	1	1.3356	0.0420
ep	limon organique	ornbz1	0	1.2062	0.0682
ep	limon organique	orbiz2	1	1.6523	-0.0288
ep	limon organique	ornbz2	0	1.3053	0.0383
ep	limon organique	orbiz3	1	1.126	0.0686
ep	limon organique	ornbz3	0	1.2301	0.0553
Marle					
ma	limon moyen	lmbz1	0	1.1763	0.0530
ma	limon + cailloux calcaires	lcnbz1	0	1.2035	0.0422
ma	colluvium	conbz2	0	1.1893	0.0512
ma	limon argileux	labiz1	1	1.2344	0.0397
ma	limon argileux	lanbz1	0	1.0886	0.0780
ma	limon argileux	labiz2	1	1.2491	0.0366
ma	limon argileux	lanbz2	0	1.1103	0.0712
ma	limon argileux	lanbz3	0	1.3259	0.0505
ma	alluvions	lbnbz2	0	1.2640	0.0480
ma	craie + limon	cbbic1	1	0.9192	0.1098
ma	craie + limon	ccbic2	1	1.1058	0.0617

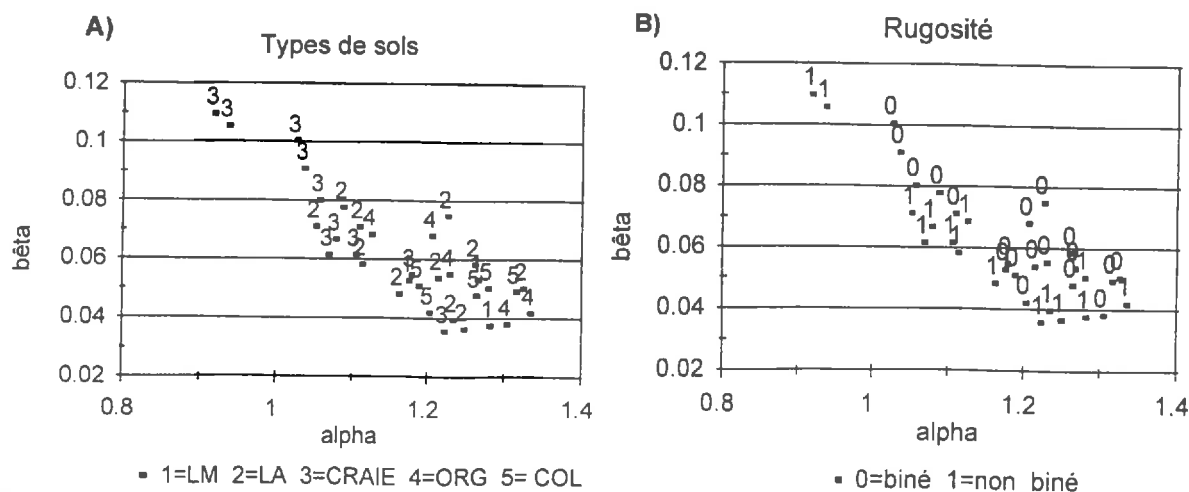


Figure 3-26. Les paramètres des droites des sols en fonction A) des types de sol (1= Limon moyen, 2= limon argileux, 3= craie, 4=limon organique, 5= colluvium) et B) de la rugosité (0= biné, 1= non-biné).

sauf au centre du plateau. Sur les bordures et les versants exposés à l'Est et au Sud-Est, les horizons illuviaux aux textures de limon argileux (LA) sont plus étendus et donnent des terres plus motteuses et plus sombres. Sur les versants exposés au Sud et à l'Ouest, les sols sont superficiels parfois crayeux (terres blanches) sur le versant, en pente souvent plus accentuée.

Le site de Marle est compris dans la petite région naturelle du Marlois qui prolonge, vers l'Est, le Saint-Quentinois. C'est aussi un plateau, d'altitude s'étagant de 140m au Nord-Ouest, 110m. puis 150m au Sud-Est et dont le relief, plus accentué du fait du relèvement de la craie, est structuré par la vallée de direction Est-Ouest de la Serre (80m). Il est recouvert d'un épais manteau de limon loessique (3 à 11m) enfouissant souvent de l'argile à silex (1 à 10m). Les sols qui se développent sur les limons sont aussi du type sol brun lessivé. Ces sols ont subi une forte érosion, le limon moyen des horizons éluviaux n'est plus très représenté, par contre, le limon argileux des horizons illuviaux affleure largement, relayé sur les versants, surtout au Nord de la Serre, par des affleurements d'argile à silex plus ou moins remaniée. Sur les versants crayeux, les sols de type rendzine ou sol brun calcaire donnent des terres blanches, caillouteuses, parfois avec des silex. Enfin, le Marlois est bordé au Sud-Ouest par la vaste dépression tourbeuse des Marais de la Souche et les versants de raccordement portent soit des formations résiduelles des sables thanétiens, soit des épandages sableux des sables de Sissonne, qui influencent une frange plus ou moins large des dépôts limoneux et donnent des terres aux textures de limon argilo sableux, limon moyen sableux, limon sableux, battantes ou très battantes.

3.3.1.4 Les droites de sols

La cinquantaine de parcelles suivies représentent pour nous un échantillon des différents sols de la région. Nous en avons dressé une typologie Tableau 3-8.

Sur des parcelles choisies comme représentatives de ces différents types de sols, nous avons réalisé des mesures de réflectance (avec le réflectancemètre CIMEL 3 bandes) de façon à quantifier les droites de sol caractéristiques de ces types de sol:

$$\rho_{PIR} = \alpha \rho_{rouge} + \beta$$

Eq. 3-25

Cela a été fait pour chaque type de sol (dans chaque situation topographique). La réflectance a été mesurée également sur les sols binés pour caractériser l'effet de la rugosité sur la réflectance.

Les résultats des calculs des paramètres α et β des droites de sol sont représentés à la Figure 3-26A. On observe une assez forte variabilité de ces coefficients: la pente variant entre 0.91 pour des sols de craie et 1.3 pour des limons à forte teneur en matière organique; l'ordonnée à l'origine variant de façon corrélée, dans le sens opposé. Baret *et al.* (1993) ont trouvé une relation similaire sur des sols argiles-limons, mais de fortes valeurs de β (1.77 à 3.56) sur la tourbe.

On constate que le binage modifie également les droites des sols, en diminuant à la fois la pente et l'ordonnée à l'origine (Figure 3-26B).

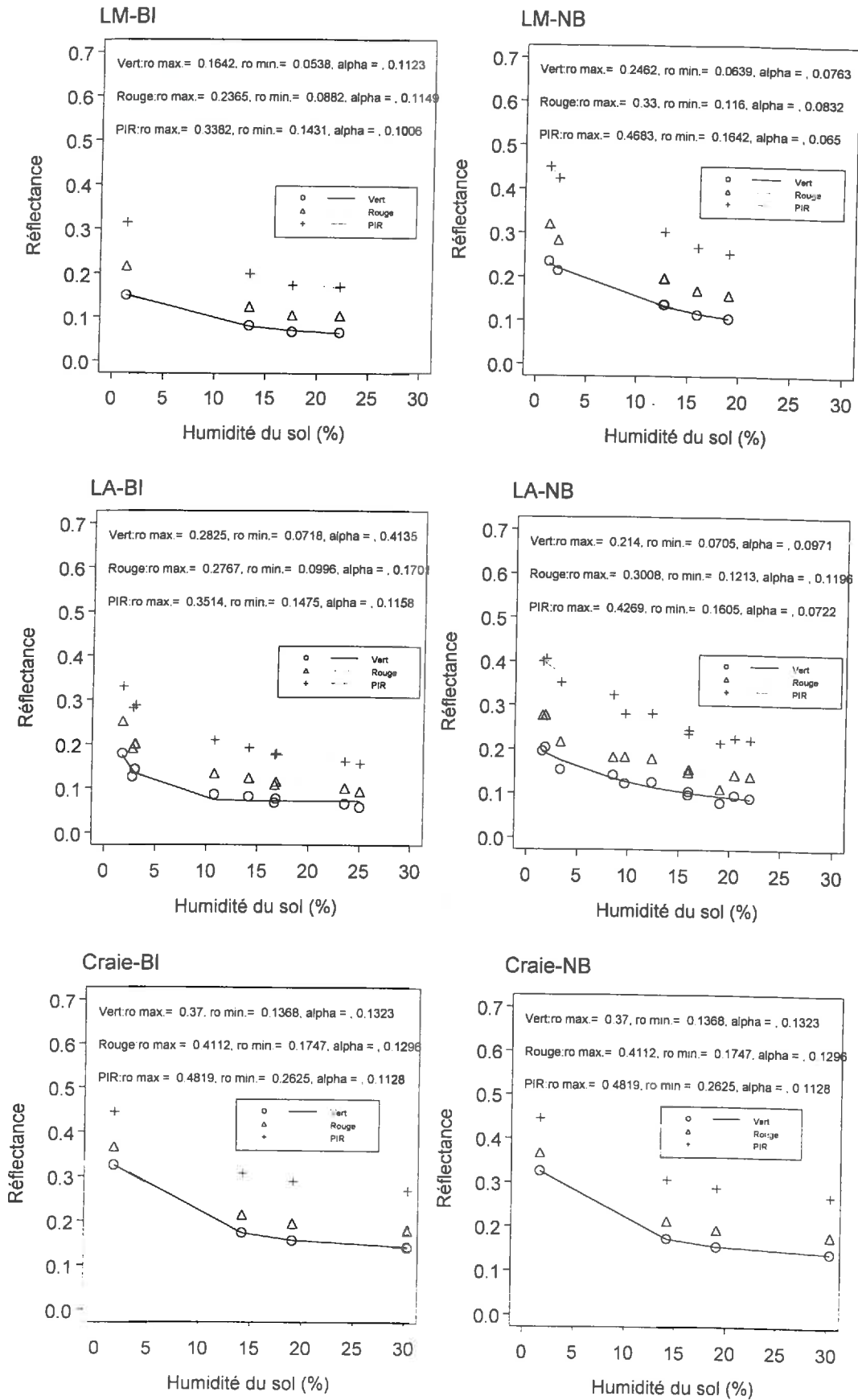


Figure 3-27. Relations réflectance du sol - humidité de surface pour 3 types de sols (LM, LA, Craie) et 2 états de rugosité (BI = biné, NB=non-biné), dans les 3 bandes spectrales.

3.3.1.5 Les relations réflectance-humidité

Des mesures associées de réflectance et d'humidité ont été réalisées pour caractériser ces relations pour chaque type de sol. Pour faire varier les niveaux d'humidité, la surface a été arrosée et on a attendu quelques instants pour que l'humidité devienne relativement homogène. Puis la réflectance a été mesurée sur quatre répétitions sur une surface de 2m². Immédiatement après la mesure, un échantillon de la surface du sol a été prélevé pour déterminer l'humidité par la méthode gravimétrique. Cette opération a été répétée 3-4 fois jusqu'à ce que la surface de sol soit très humide. Les relations réflectance-humidité (cf. Eq. 3-25) sont présentées à la Figure 3-27 pour 3 des principaux types de sol et les 2 classes de rugosité. L'ensemble des résultats pour tous les types de sols sont synthétisés dans le Tableau 3-9.

Tableau 3-9. Coefficients des relations réflectance-humidité (Eq. 3-18) pour les différents types de sol et les 3 bandes spectrales.

code sol	Vert			Rouge			PIR		
	ρ_{max}	ρ_{min}	alpha	ρ_{max}	ρ_{min}	alpha	ρ_{max}	ρ_{min}	alpha
Eppeville									
lmbiz1	.1642	.0538	.1123	.2365	.0882	.1149	.3382	.1431	.1006
lmnbz1	.2462	.0639	.0763	.33	.116	.0832	.4683	.1642	.065
labiz1	.1702	.0424	.0747	.2439	.0765	.0818	.3171	.0691	.0394
lanbz1	.2349	-3.6611	.0017	.3135	-4.7372	.0016	.4346	-7.159	.0013
labiz2	.1898	.0604	.0903	.2606	.092	.0801	.3422	.1237	.0529
lanbz2	.1871	.0862	.136	.2583	.121	.1334	.3913	.2176	.1191
labiz3	.2825	.0718	.4135	.2767	.0996	.1701	.3514	.1475	.1158
lanbz3	.214	.0705	.0971	.3008	.1213	.1196	.4269	.1605	.0722
cobiz2	.3926	.0908	1.0969	.5382	.1372	1.0895	.7611	.2266	1.1322
conbz2	.2606	-.985	.0082	.341	-.2582	.0232	.4921	-3.552	.0038
cbbic1	.1886	.0711	.0452	.246	.1111	.0455	.3293	.1612	.0339
cbnbc1	.3414	.1575	.14	.4255	.218	.1374	.5329	.3123	.1414
ccbic2	.2311	.053	.1028	.2949	.0881	.1115	.371	.1444	.0949
ccnbc2	.2399	.0925	.1346	.3261	.1346	.1293	.4402	.2145	.1307
cpbic3	.2852	.1161	.1075	.3372	.1722	.1249	.431	.2594	.1387
cpnbc3	.3305	.1661	.0994	.4076	.2237	.0977	.5194	.3308	.0986
cgbic4	.7916	.1565	.8149	.7915	.1956	.7677	.467	.2759	.1555
cgnbc4	.3848	.1635	.1035	.4369	.2091	.1015	.5408	.3033	.0951
orbiz1	.1767	.0576	.1015	.2521	.093	.1013	.3704	.1582	.0872
ornbz1	.264	-.0139	.0453	.3605	.0589	.0594	.5001	.0936	.0486
orbiz2	.1948	.0602	.1203	.2602	.0953	.1046	.397	.1076	.0893
ornbz2	.2971	.1322	.2451	.4004	.195	.2522	.5336	.2864	.1874
orbiz3	.1881	.0672	.1624	.2603	.1003	.1449	.3845	.1903	.1963
ornbz3	.2319	-3.6486	.0016	.319	-3.6053	.002	.459	-5.4288	.0016
Marle									
labiz1	.1646	.0477	.1075	.2342	.074	.1069	.3256	.1237	.0959
lanbz1	.2179	.0843	.1529	.2933	.1194	.1316	.3981	.2053	.1276
labiz2	.1608	.013	.062	.2167	.0157	.056	.3064	.515	.054
lanbz2	.2346	.0691	.0929	.3142	.1091	.0993	.4177	.1775	.0867
lanbz3	.1604	.0565	.1066	.2187	.086	.1103	.3395	.1631	.107
llnbz2	.1603	.0555	.1337	.2198	.0841	.1256	.3239	.1516	.118
lmnbz1	.2086	.0598	.0927	.2945	.1062	.112	.3966	.1654	.0953
lcnbz1	.2211	.0796	.1081	.305	.1217	.1011	.4052	.169	.0812
conbz2	.1662	.0361	.0712	.2309	.0637	.0749	.3261	.116	.0681
cbbic1	.285	.1156	.0632	.337	.1656	.0658	.4234	.2859	.1002
ccbic2	.2223	.0887	.2039	.2902	.1291	.1956	.432	.2073	.3433

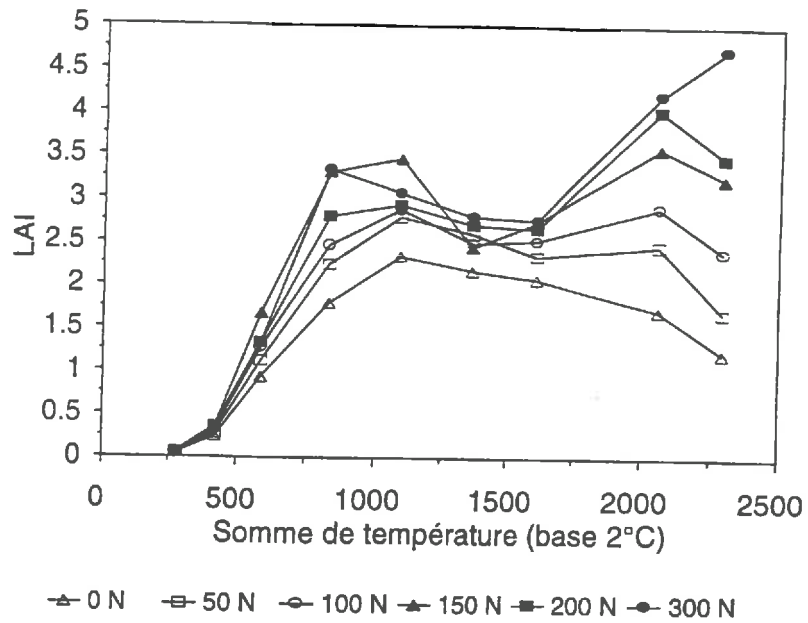


Figure 3-28. Évolution du LAI des six traitements azotés. Clermont-les-Fermes, 1994. Droulin, 1995.

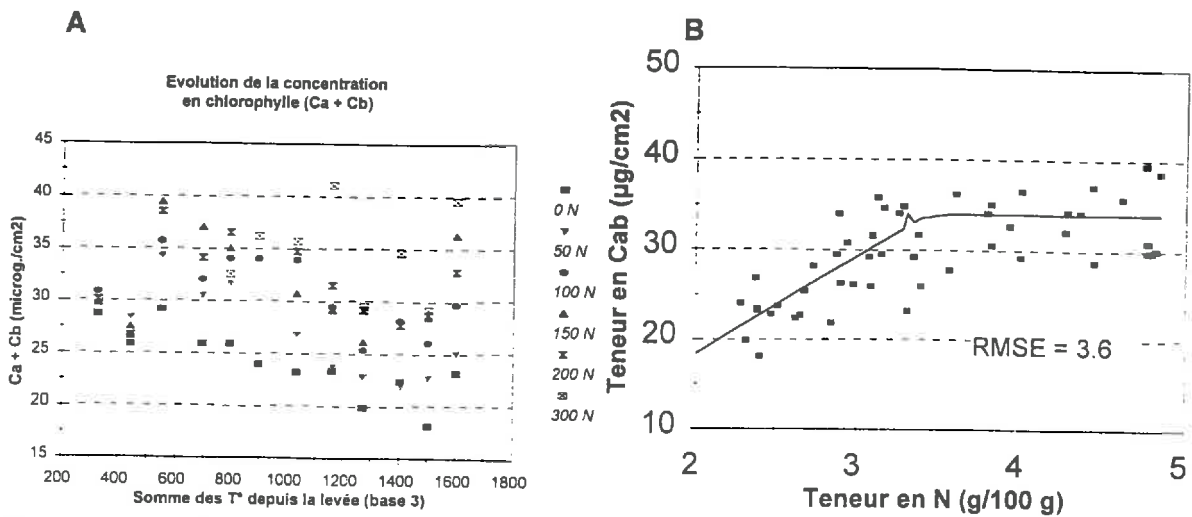


Figure 3-29. A) Évolution de la chlorophylle des six traitements azotés, Clermont-les-Fermes, 1994. Source: Droulin, 1995. B) Relation teneur en chlorophylles - teneur en azote des limbes (Guérif *et al.*, 1995).

3.3.2 Variabilité des caractéristiques de la culture

Les propriétés optiques des feuilles et le port foliaire de la culture varient au cours du temps et dans l'espace. Les principaux facteurs de variations sont:

- l'âge: il joue de deux façons:
 - ⇒ sur la modification du port foliaire en fonction du stade de développement de la culture
 - ⇒ sur la modification de la composition biochimique de la feuille et corrélativement les propriétés optiques des feuilles
- les conditions d'alimentation hydrique et minérale qui influent:
 - ⇒ sur le port foliaire (affaissement des feuilles avec la diminution de la turgescence liée au stress hydrique)
 - ⇒ sur la teneur en azote des feuilles (et corrélativement celle en chlorophylles) qui affecte les propriétés optiques des feuilles dans le vert et le rouge
- le cultivar: il semble objectivement y avoir des variations dans la couleur et le port des feuilles selon les cultivars observés. Cependant, compte tenu de la difficulté d'appréhension de ce facteur et de l'absence d'une typologie des cultivars vis à vis de ces critères, nous supposons dans la suite que la variation liée à ce facteur est comprise dans la variation des deux autres facteurs.

Pour avoir une idée de la variabilité induite par ces facteurs, nous nous sommes appuyés sur des résultats obtenus par l'équipe lors d'une expérimentation sur l'effet de nutrition azotée sur la croissance et la réflectance de la betterave, avec l'appui de l'I.T.B. (Guérif *et al*, 1995, Machet *et al*, 1995, Droulin, 1995). Dans cette expérimentation, réalisée sur une parcelle d'agriculteur à Clermont-Fermes (environ 20km N-E de Laon) 5 niveaux de fertilisation ont été appliqués (0, 50, 100, 150, 200, et 300kg d'azote/ha). Ces niveaux de fertilisation, et le stress hydrique qui est intervenu au mois de Juillet (entre 900 et 1700°C-jours) ont créé des situations d'alimentation hydrique et minérale très contrastées, bien illustrées par l'évolution des LAI pour les différents traitements (Figure 3-28). Généralement, plus la culture a reçu d'azote, plus le LAI est important, mais, pendant la période de stress hydrique, et à cause de l'interaction biomasse x transpiration, les chutes de LAI sont plus évidentes pour les cultures les plus fertilisées dont la réserve d'eau était plus fortement diminuée par une forte évapotranspiration avant la sécheresse.

3.3.2.1 Propriétés optiques

Au cours de la croissance, la teneur en chlorophylles a et b des limbes a été mesurée par prélèvement au champ de pastilles de limbes sur l'ensemble des feuilles vertes de la culture, extraction à froid des chlorophylles a et b par le diméthylformamide et dosage au laboratoire par spectrophotométrie d'absorption (Lichtenthaler et Weillburn, 1983). La Figure 3-29 montre l'évolution de la teneur en chlorophylles (Cab) exprimée en microgrammes de pigments par cm² de feuille. Elle permet de caractériser à la fois la variabilité due aux conditions d'alimentation et l'évolution temporelle.

On observe une assez grande variation des valeurs entre 20 et 40 microgramme-cm⁻² selon le niveau de fertilisation et la date (entre 25 et 40 si on exclut les traitements 0N et 50N, que l'on a peu de

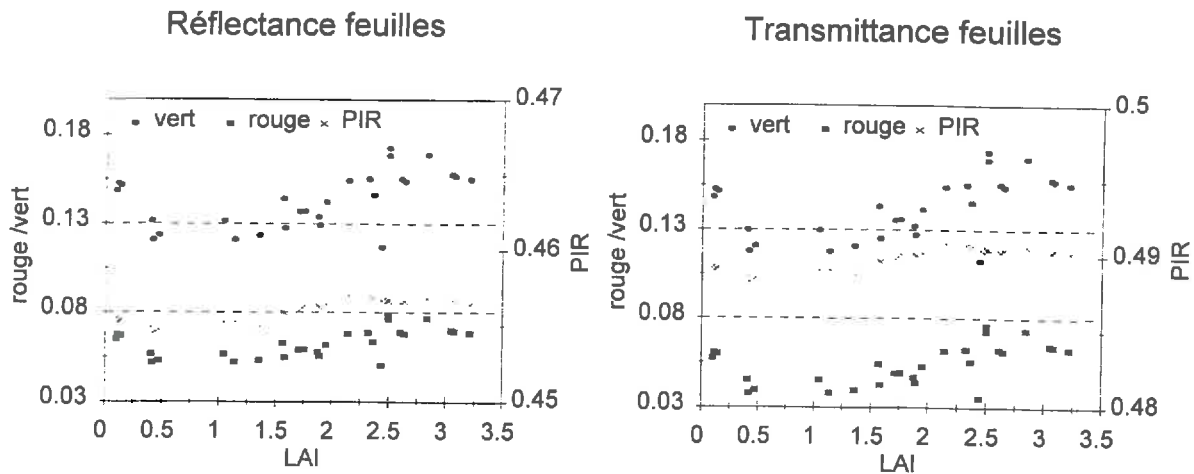


Figure 3-30. Évolution des propriétés optiques (réflectance et transmittance dans les 3 bandes spectrales et pour différents niveaux de fertilisation azotée) des feuilles en fonction du niveau de LAI. Clermont-les-Fermes, 1994. (Guérif, non publié).

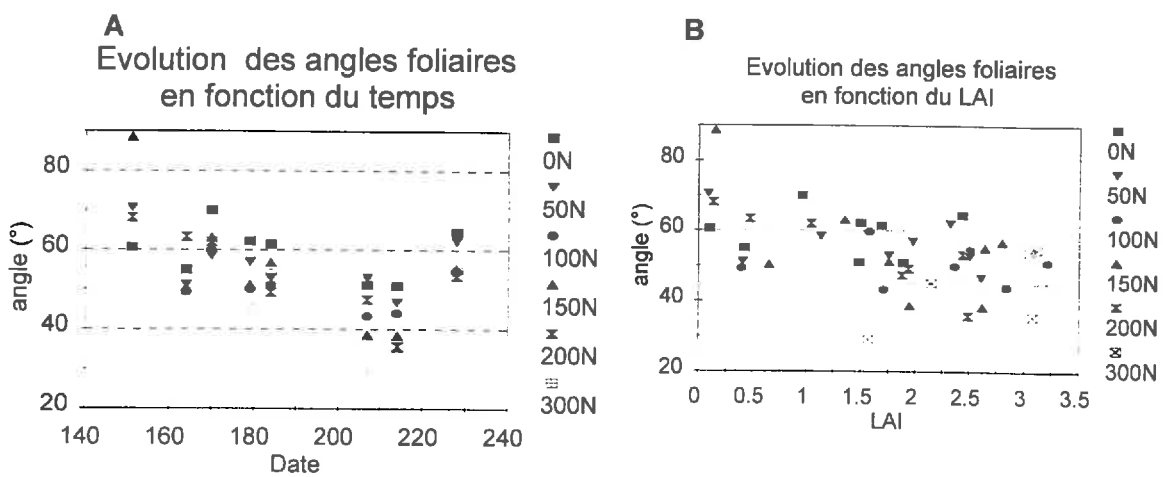


Figure 3-31. Évolution des angles foliaires -obtenus par inversion du modèle SAIL sur des données de réflectances de couvert mesurées pour différents niveau de fertilisation azotée. A) en fonction du temps B) en fonction du LAI. (Guérif, 1995, non publié).

chances de rencontrer en situation réelle). À partir de valeurs initiales non différenciées, l'évolution de la teneur en chlorophylles dépend du niveau de fertilisation azotée: plus il y a d'azote apporté, plus il y a de chlorophylles (Figure 3-29B). Généralement, pour des niveaux de nutrition azotée non limitants à ce stade, la teneur en chlorophylle est aux alentours de 35 jusque vers 900°C.j (LAI de l'ordre de 2 à 3), puis pour un niveau donné, elle décroît régulièrement au dessous de 30 microgramme-cm⁻². Cette décroissance est probablement amplifiée par le stress hydrique qui intervient entre 1000 et 1500 °C.j, mais la reprise de la croissance du LAI après 1750°C.j avec la levée du stress hydrique n'a pas été suivie par une augmentation de Cab. En fait, cette décroissance est liée à la décroissance normale de la teneur en azote des feuilles au cours du temps (courbe de "dilution"), via la relation qui existe entre teneur en chlorophylles et teneur en azote des limbes (Guérif *et al*, 1995, Figure 3-29B).

À partir de cette caractérisation de la teneur en chlorophylle des limbes, on peut estimer les propriétés optiques des feuilles (réflectance et transmittance) en utilisant le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990). Nous les avons représentées à la Figure 3-30, non plus en fonction du temps, mais en fonction du LAI ce qui est une manière de prendre en compte à la fois l'effet de l'âge et des conditions de croissance. On a exclu dans ces données les valeurs des traitements très carencés en azote (0N et 50N).

On retrouve, conformément à ce qui est attendu, qu'il n'y a pas de variation sensible des propriétés dans le PIR (autour de 0.455 pour la réflectance et de 0.490 pour la transmittance), mais une évolution dans le vert et le rouge, avec des valeurs plus faibles pour la gamme de LAI de 0 à 2 (autour de 0.137 et 0.059 pour la réflectance, 0.135 et 0.049 pour la transmittance respectivement dans le vert et le rouge) et des valeurs plus fortes pour des LAI plus élevés (autour de 0.148 et 0.065 pour la réflectance, 0.147 et 0.057 pour la transmittance respectivement dans le vert et le rouge).

3.3.2.2 Angles foliaires

Des mesures de réflectances avec le radiomètres CIMEL 5 bandes ont été faites sur les 6 traitements de cette expérimentation. Connaissant pour chaque date de mesure et chaque traitement la configuration de mesure, le LAI, les propriétés optiques et la réflectance du sol, le modèle SAIL a été inversé pour retrouver l'angle foliaire moyen. Les résultats obtenus (Guérif, non publié) sont présentés à la Figure 3-31. On constate un effet du traitement lorsque les angles sont portés en fonction du temps. Excepté un point un peu aberrant pour la première date, les angles évoluent entre 70 et 35 degrés, avec des angles plus forts, donc un port plus dressé pour les faibles niveaux de nutrition azotée, et les dates précoces. Lorsqu'on porte les angles en fonction du LAI, on constate que le LAI explique une part de cette variabilité et qu'il y a lieu de considérer là aussi deux gammes de LAI=2: pour des LAI inférieurs à deux, le port est plus dressé (ou érectophile), l'angle moyen est de l'ordre de 60°; pour des LAI supérieurs à 2, le port est plus étalé (ou planophile), l'angle moyen est de l'ordre de 45°. Le coefficient de variation autour de ces valeurs moyennes est de l'ordre de 10%.

Mise au point du modèle couplé

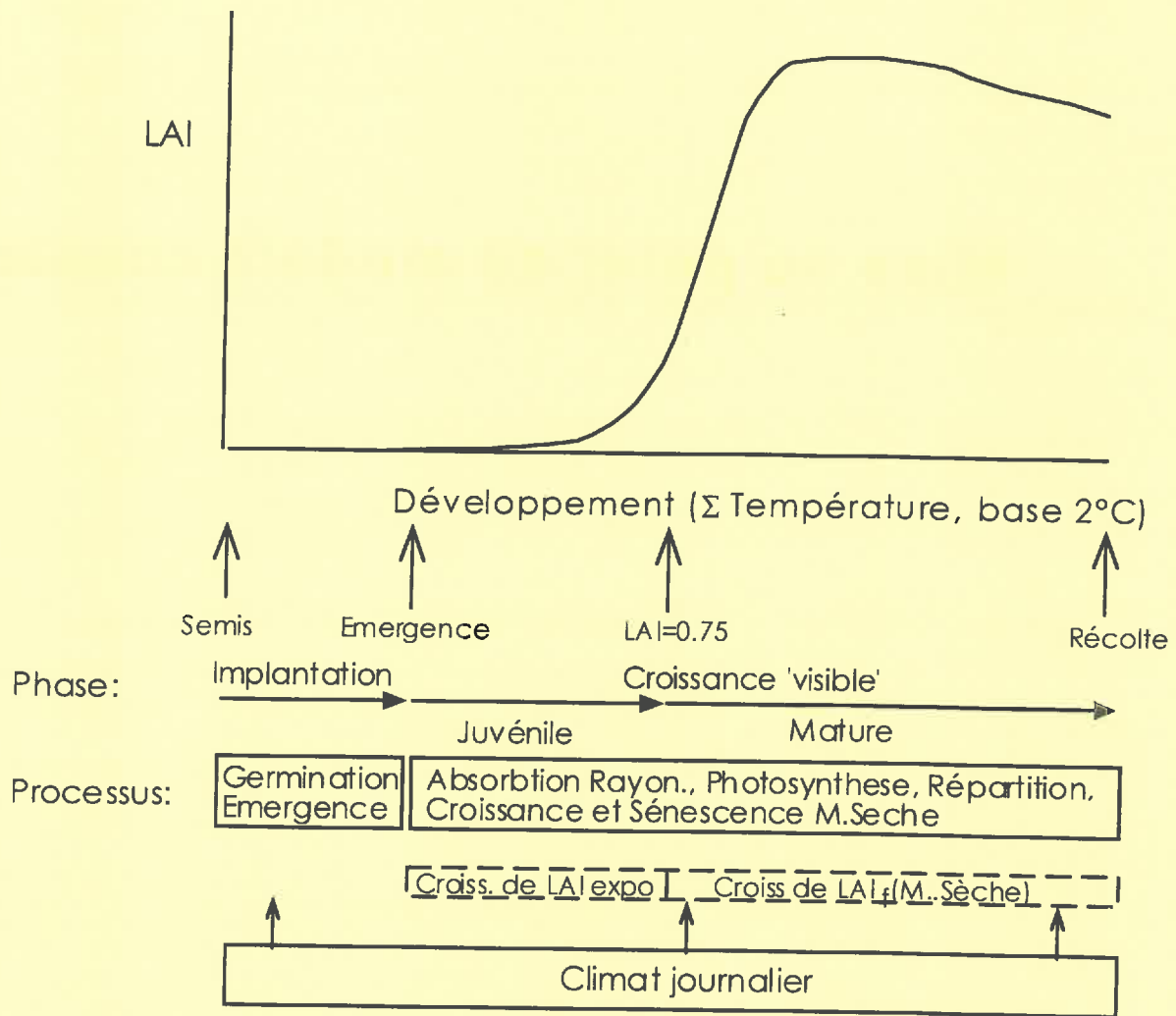


Figure 4-1. Schéma des principales phases de la croissance de la betterave dans le modèle SUCROS.

4. Mise au point du modèle couplé SUCROS+SAIL

Tous les modèles utilisent un certain nombre des paramètres qui contrôlent les fonctions et déterminent les résultats finaux. Avant qu'un modèle puisse être utilisé, il doit être évalué, et ses paramètres vérifiés: un étalonnage est nécessaire pour adapter le modèle aux conditions où on veut l'appliquer et aux caractéristiques des cultures concernées.

Avant de procéder à cet étalonnage, il est bon de conduire une analyse de sensibilité du modèle vis à vis de ses paramètres. Celle-ci consiste à étudier la réaction des variables de sortie à des écarts imposés aux paramètres. Cette analyse permet de choisir quels paramètres doivent être prioritairement étalonnés selon leur importance dans le fonctionnement des modèles. L'étude de la sensibilité de SAIL a déjà été pratiquée par plusieurs auteurs (cf. Chapitre 2): nous leur emprunterons leurs résultats.

Après avoir ainsi identifié les paramètres à étalonner pour chacun des deux modèles SUCROS et SAIL, on présentera comment ils ont été estimés pour les deux modèles à partir des jeux des données acquis sur la croissance et la réflectance d'une culture de betterave décrits au Chapitre 3. Après couplage des deux modèles on montrera comment on a procédé à la vérification de leur bon fonctionnement. A cet effet, on s'est assuré que les modèles seraient capables de rendre compte du comportement d'une culture pour laquelle on a induit expérimentalement des caractéristiques d'implantation différentes.

4.1 SUCROS

4.1.1 Description détaillée de SUCROS

C'est un modèle dynamique qui simule la croissance et le développement de la betterave au cours d'une saison en conditions de croissance potentielle. Il est décrit en détail par Spitters *et al.* (1989). Nous nous bornerons ici à en donner les grandes lignes.

Le pas de temps est journalier, mais les calculs de l'absorption du rayonnement et de la photosynthèse sont faits au niveau instantané dans la journée et une intégration donne une production d'assimilats journaliers. Les paramètres sont des coefficients intervenant dans les fonctions biophysiques de fonctionnement de la culture. Les données d'entrées sont la date, la densité de semis, et le jour de récolte.

On peut découper le cycle de la culture en trois périodes pour la description des phénomènes de croissance: une phase d'implantation, une phase de croissance juvénile, et une phase de croissance mature (cf. Figure 4-1).

- **Implantation:** Cette phase commence avec le semis et se termine à la levée de la culture. Elle a une durée fixe exprimée en somme de température (base 3°C) déterminée et se résume donc à ce seul paramètre $SEMERG=120^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$. La levée est considérée comme un événement binaire (oui/non).

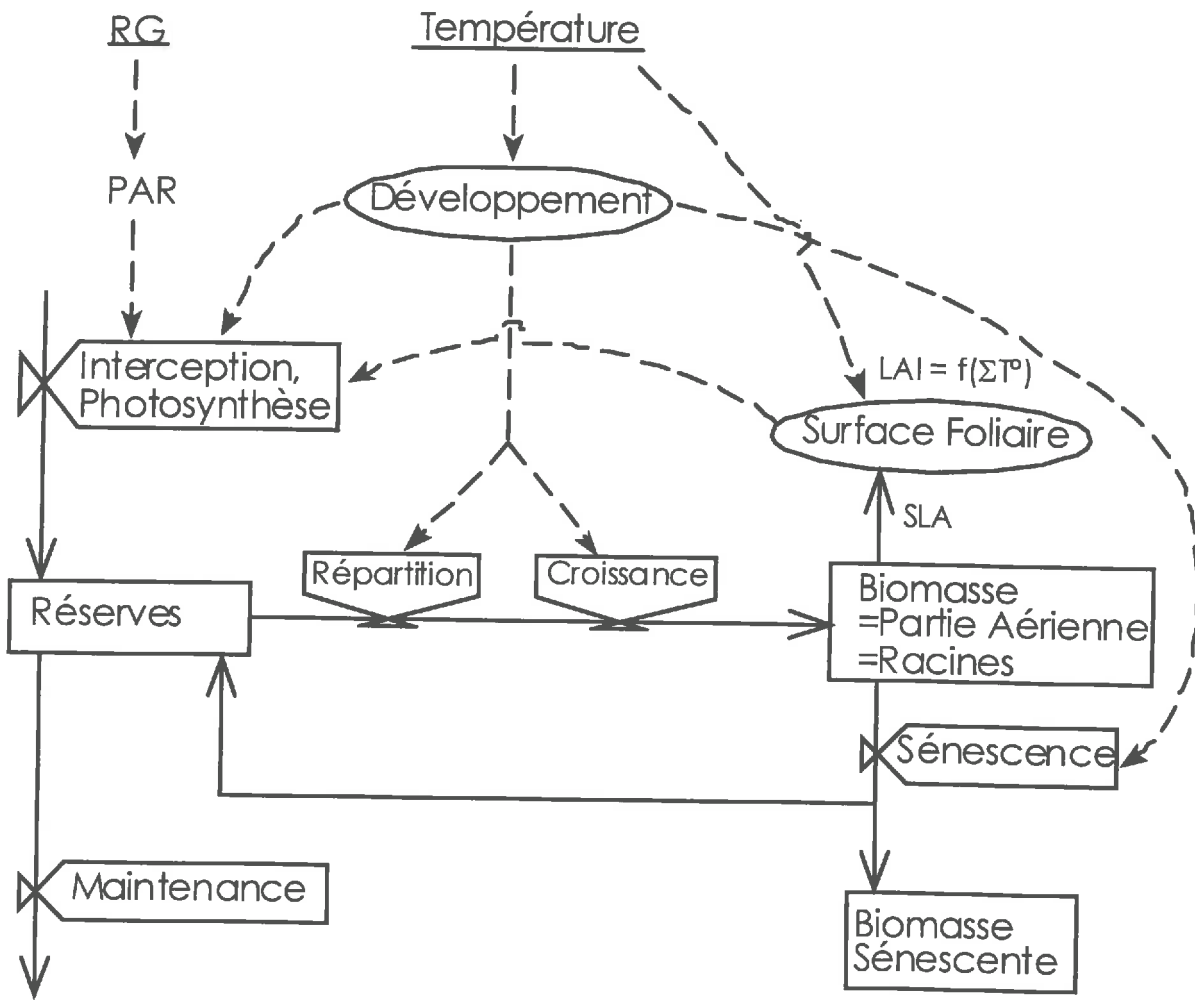


Figure 4-2 Représentation schématique des fonctions de SUCROS (d'après Spitters *et al.*, 1989)

Pour étalonner cette partie du modèle, nous avons été amenés à définir en fait le stade de levée pour un taux de 80% du taux final de plantes levées.

A partir du jour de la levée, le schéma journalier de croissance par assimilation du carbone et répartition des assimilats se met en place. On distingue cependant deux phases selon qu'il y a ou non compétition pour la lumière entre les plantes. Ce stade est représenté par un stade moyenne de croissance du LAI (LAI=0.75), ce qui correspond au début de recouvrement des plantes sur le rang.

- **Croissance juvénile:** Avant ce stade, la croissance du LAI est décrite par une fonction exponentielle de la somme de température exprimé sous la forme générique de l'Eq. 4-1, qui exprime une croissance sans limitation autre que la température. Les paramètres caractéristiques sont la densité des plantes (NPL , plantes·m⁻²), la surface moyenne des feuilles d'une plante ($LA0$, cm²·plante⁻¹), la vitesse relative de croissance en surface des feuilles ($RGRL$, cm²·cm⁻²·°C⁻¹), et une somme de température depuis la levée ($TSUMEM$, °C·j) sous la forme:

$$LAI = LA0 \cdot NPL \cdot \exp^{RGRL \cdot TSUMEM}$$

Eq. 4-1

Le produit de $LA0$ et NPL est le LAI initial ($LAI0$).

- **Croissance mature:** Après le stade LAI=0.75, avec l'apparition de la compétition entre plantes, c'est le bilan entre la quantité d'assimilats produite et répartie vers les limbes et celle perdue par sénescence qui assure la croissance du LAI, via une conversion masse/surface faisant intervenir la surface spécifique, SLA (Specific Leaf Area, cm²·g⁻¹).

4.1.1.1 Schéma journalier de la croissance

Il est illustré par la Figure 4-2. Les flèches en pointillé montrent les transferts d'information et les flèches en continu montrent les flux de matière. Le contrôle du taux de ces flux est représenté par le symbole d'une bobinette; enfin, les variables d'état sont représentées par des rectangles.

La simulation de la croissance d'une journée commence avec l'entrée du rayonnement global incident. Une fraction du rayonnement utile à la photosynthèse (PAR) est absorbé (APAR) par le couvert et fournit l'énergie nécessaire à la production d'assimilats. Les assimilats produits par la photosynthèse entrent dans un pool avec les réserves récupérées par la rémobilité d'une partie des organes sénescents. Les assimilats qui restent après les dépenses faites sous forme de respiration de maintenance sont répartis vers les organes de la culture et transformés en matière sèche moyennant un coût énergétique de croissance dépendant de l'organe considéré. Comme on l'a vu plus haut, la description de la croissance du LAI dépend du stade de la culture: pendant la phase juvénile, elle ne dépend que de la somme de température; pendant la phase mature, elle est calculée à partir du bilan entre la sénescence et la croissance en masse des limbes et de la surface spécifique. L'ensemble des variables d'états sont alors mises à jour par intégration. Le nouveau LAI est utilisé pour l'absorption du rayonnement le jour suivant.

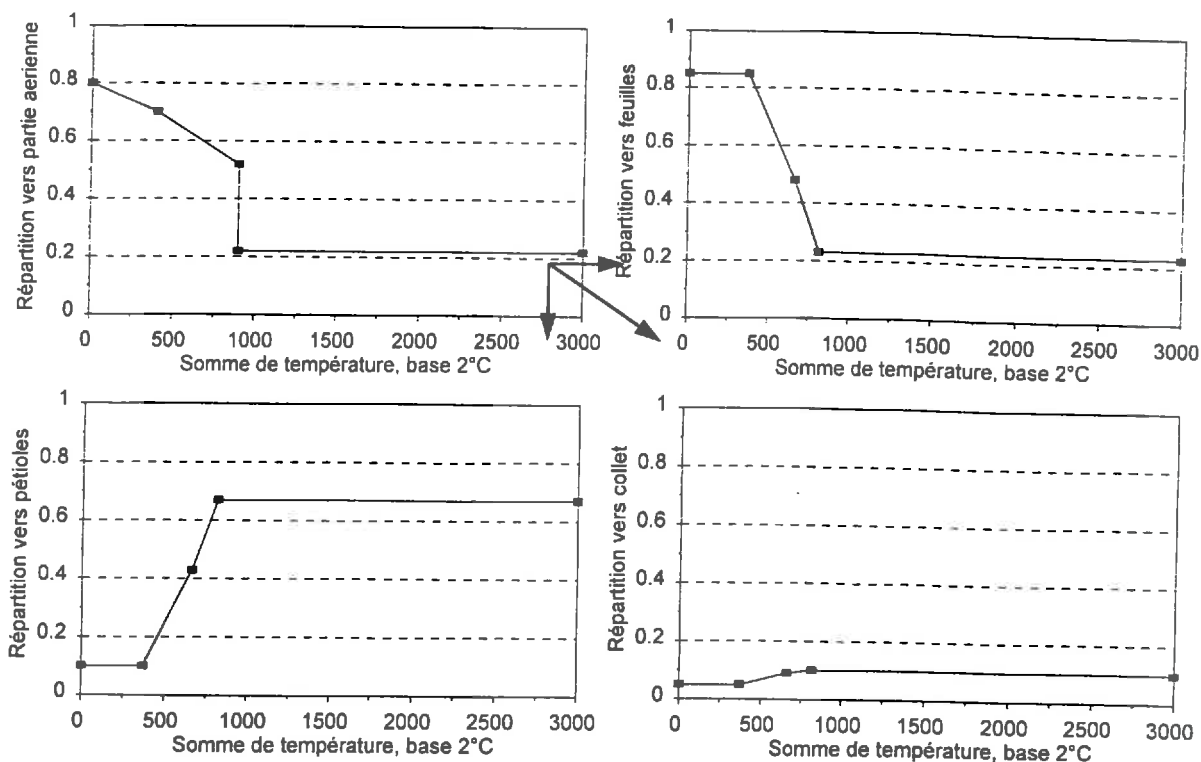


Figure 4-3 Les fonctions de répartition des assimilats dans SUCROS, en fonction de la somme de température (base 2°C) depuis la levée. Les assimilats dirigés vers la partie aérienne sont ensuite répartis entre les différents organes (feuilles, pétioles, collets).

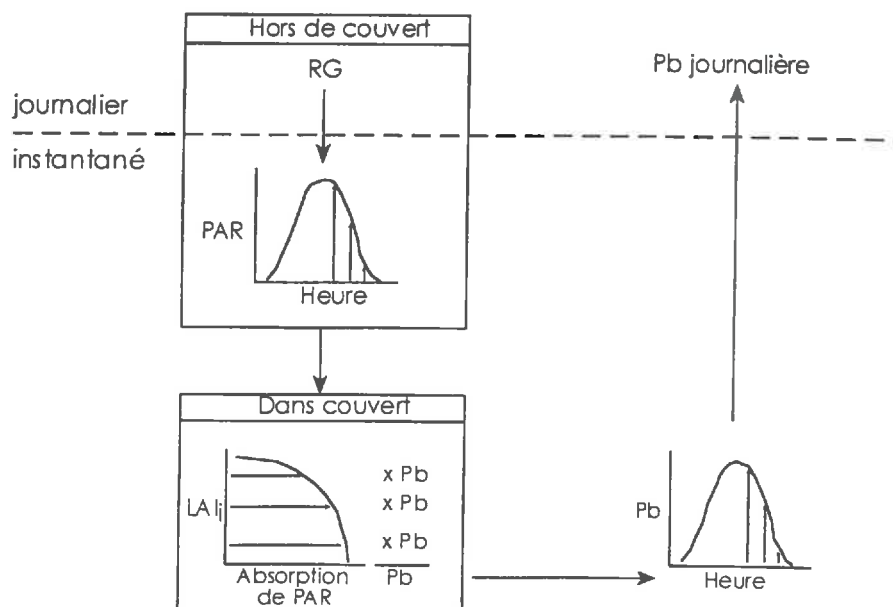


Figure 4-4. Schéma de la modélisation de l'absorption de rayonnement et de la photosynthèse brute dans SUCROS.

Le stade de développement de la culture, exprimé par la somme de température (base 2°C) depuis la levée, intervient à plusieurs endroits dans ce schéma. Il gère en particulier la répartition des assimilats vers les différents organes (Figure 4-3). Il intervient également sur le paramétrage de l'efficacité de la photosynthèse (cf. plus loin), ainsi que sur le taux de sénescence. La température intervient également sur l'efficacité de la photosynthèse (cf. plus loin), et sur la respiration.

4.1.1.2 La modélisation de l'absorption de rayonnement et de la photosynthèse brute

Comme l'absorption du PAR et la photosynthèse constituent une part essentielle, la plus mécaniste du modèle au niveau instantané, nous présentons ici brièvement leur modélisation.

Pour accroître la précision des estimations de la photosynthèse et prendre en compte les variations horaires du PAR ainsi que celles induites par l'atténuation de la lumière à l'intérieur du couvert, les calculs sont faits de façon instantanée (pour une heure de la journée et une hauteur dans le couvert), et intégrés ensuite sur l'épaisseur de la canopée et sur la journée (Figure 4-4).

La méthode (méthode Gaussienne) utilisée dans SUCROS pour simplifier les calculs tout en gardant la précision, est celle introduite par Goudriaan (1986). L'intégration Gaussienne est décrite dans plusieurs ouvrages sur les méthodes numériques (ex. Press *et al.*, 1992). Le modèle décompose le PAR quotidien au niveau instantané, selon la hauteur du soleil (partie gauche de la Figure 4-4). Pour 3 points également répartis selon l'abscisse des temps, la photosynthèse est calculée. Les valeurs obtenues pour chacun des trois points seront ensuite pondérées selon leur position sur l'abscisse par un jeu de coefficients; leur somme donnant une très bonne approximation de l'intégrale de la photosynthèse journalière (Goudriaan 1986) (partie droite de la Figure 4-4).

En chacun des points précédents, le calcul de la photosynthèse dans la canopée prend en compte la variation du PAR dans l'épaisseur du couvert. En effet l'utilisation de l'intensité moyenne du rayonnement dans la canopée surestime le taux de photosynthèse à cause de la forme convexe de la réponse de l'assimilation au PAR absorbé (Spitters, 1986). Le profil du PAR dans la canopée est décrit avec une loi de Beer et un coefficient d'atténuation, k . La formulation générale de l'atténuation du PAR est donnée par l'Eq. 4-2:

$$PAR = (1 - \rho) \cdot IPAR \cdot \exp^{-k \cdot L}$$

Eq. 4-2

Une fraction, ρ du PAR incident, IPAR, est réfléchi. Le complément pénètre dans la canopée où l'intensité diminue exponentiellement avec la profondeur. La profondeur, L , correspond à une mesure de LAI cumulée qui varie entre 0 et LAI_{max}.

Le calcul de photosynthèse est fait pour trois profondeurs L dans la canopée, puis à partir de ces valeurs, l'intégrale sur l'ensemble de la canopée est calculée.

La modélisation de l'extinction du PAR incident (direct et diffus) dans la canopée est fondée sur les travaux de Goudriaan (1977), Goudriaan et van Laar (1978), Goudriaan (1977, 1982, 1986), Spitters *et al.* (1986) and Spitters (1986). Un coefficient de diffusion, SCV, et d'extinction pour le PAR diffus, $KDIF$, sont les deux paramètres du profil de décroissance exponentielle. Le recouvrement des feuilles entre elles a pour conséquence d'augmenter ces deux paramètres. Dans le modèle, un coefficient

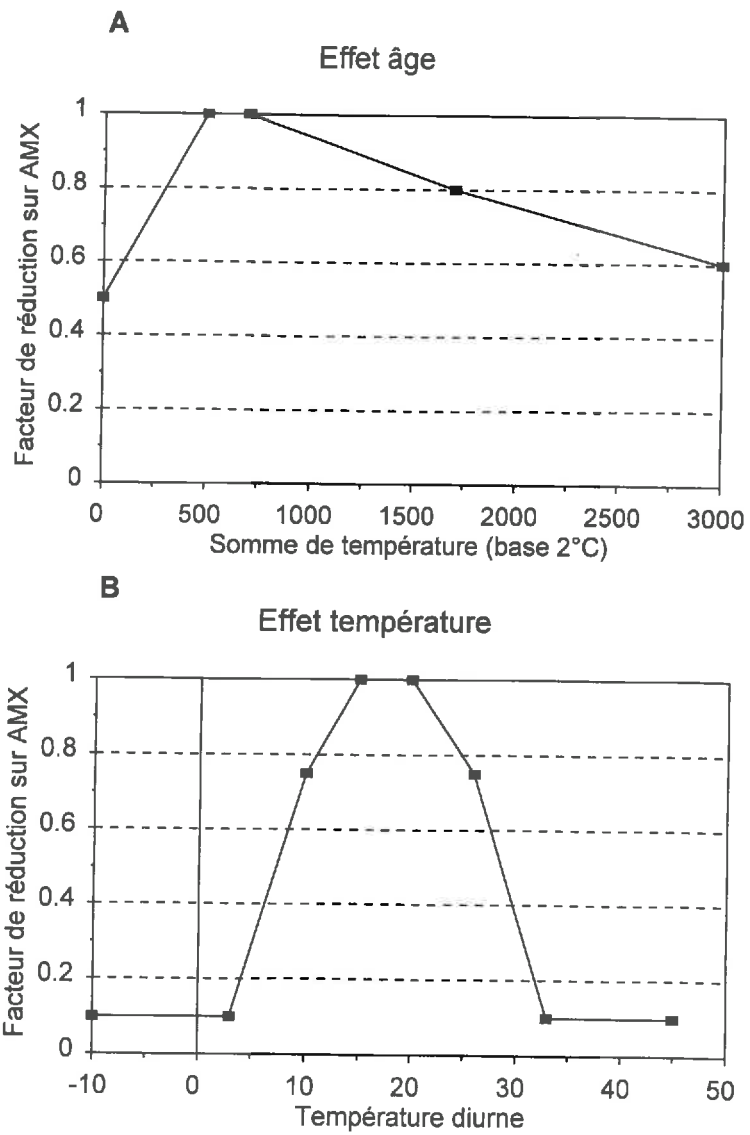


Figure 4-5. Les facteurs de réduction du taux de photosynthèse maximum (AMX). A) Effet de l'âge; B) effet de la température.

empirique de recouvrement, $CLUSTF$, est calculé à partir de ces deux paramètres. C'est le rapport entre $KDIF$ et un coefficient théorique (0.72), calculé à partir de SCV et pour une canopée ayant une distribution sphérique des angles foliaires. Ces deux paramètres $CLUSTF$ et $KDIF$ sont ensuite repris pour calculer les paramètres utilisés dans le calcul du flux direct du PAR dans la canopée. De cette façon trois flux de PAR sont explicitement modélisés:

- le PAR direct, qui est la composante du PAR direct incident qui n'a pas été diffusé par la canopée. Il dépend de la probabilité de rencontrer une feuille dans la canopée (sous hypothèse de distribution sphérique des feuilles) et du degré de recouvrement des feuilles ;
- le PAR direct-diffus, qui est la composante du PAR direct incident diffusé après interaction avec la canopée. Il dépend de l'extinction du PAR direct et contribue au flux de PAR diffus.
- le flux de PAR diffus (total) est la somme du PAR direct-diffus et du PAR incident diffus provenant de l'atmosphère.

Aux trois profondeurs dans le couvert, les photosynthèses foliaires brutes (P_b) pour les flux direct et diffus sont calculées à partir d'une loi de réponse de la photosynthèse à l'éclairement (PAR, $W \cdot m^2$):

$$P_b = AMAX \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{PAR \cdot EFF}{AMAX}\right) \right)$$

Eq. 4-3

où $AMAX$ est le taux maximum d'assimilation du CO_2 ($kg \ CO_2 \cdot ha^{-1} [feuille] \cdot heure^{-1}$); et

EFF est l'efficience initiale d'utilisation du PAR ($kg \ CO_2 \cdot J \cdot ha^{-1} \cdot heure \cdot m^{-2} \cdot s$).

$AMAX$, valeur journalière du taux d'assimilation maximal (en conditions de PAR saturant) est estimée à partir d'un taux maximal d'assimilation du CO_2 en conditions optimales (température et état de la culture). Deux facteurs de réduction interviennent dans cette estimation de $AMAX$:

- Le premier rend compte de l'état de développement (âge) de la culture (Figure 4-5A); en effet la photosynthèse brute de la culture atteint son potentiel maximal aux environs de 500-700°Cjours, il est réduit pour des feuilles soit plus jeunes soit plus vieilles.
- Le second (Figure 4-5B) rend compte de l'effet négatif des températures extrêmes. Les températures considérées sont des températures moyennes diurnes (T_{diurne}), correspondant aux heures où la photosynthèse a lieu, et calculées à partir des valeurs mini et maxi journalières ($T_{diurne} = T_{max} - 0.25(T_{max} - T_{min})$).

EFF , efficience initiale d'utilisation du PAR ($kg \ CO_2 \cdot J \cdot ha^{-1} \cdot heure \cdot m^{-2} \cdot s$) est la pente à l'origine (en fait, pour des faibles valeurs du PAR). La valeur par défaut dans SUCROS est de 0.50 ($kg \ CO_2 \cdot J \cdot ha^{-1} \cdot heure \cdot m^{-2} \cdot s$). On admet généralement qu'elle ne varie que de façon négligeable excepté pour des changements significatifs de statut azoté, ou de concentration en CO_2 de l'atmosphère environnante, avec l'apparition de stress hydrique ou en conditions de températures extrêmes (Berry and Bjorkman, 1980). Des versions antérieures de SUCROS utilisent des valeurs légèrement inférieures de EFF (-10%). Bouman (1991) a mis en évidence la sensibilité de EFF et l'a utilisé pour la recalibration de SUCROS pour simuler des cultures à partir de données obtenues par télédétection.

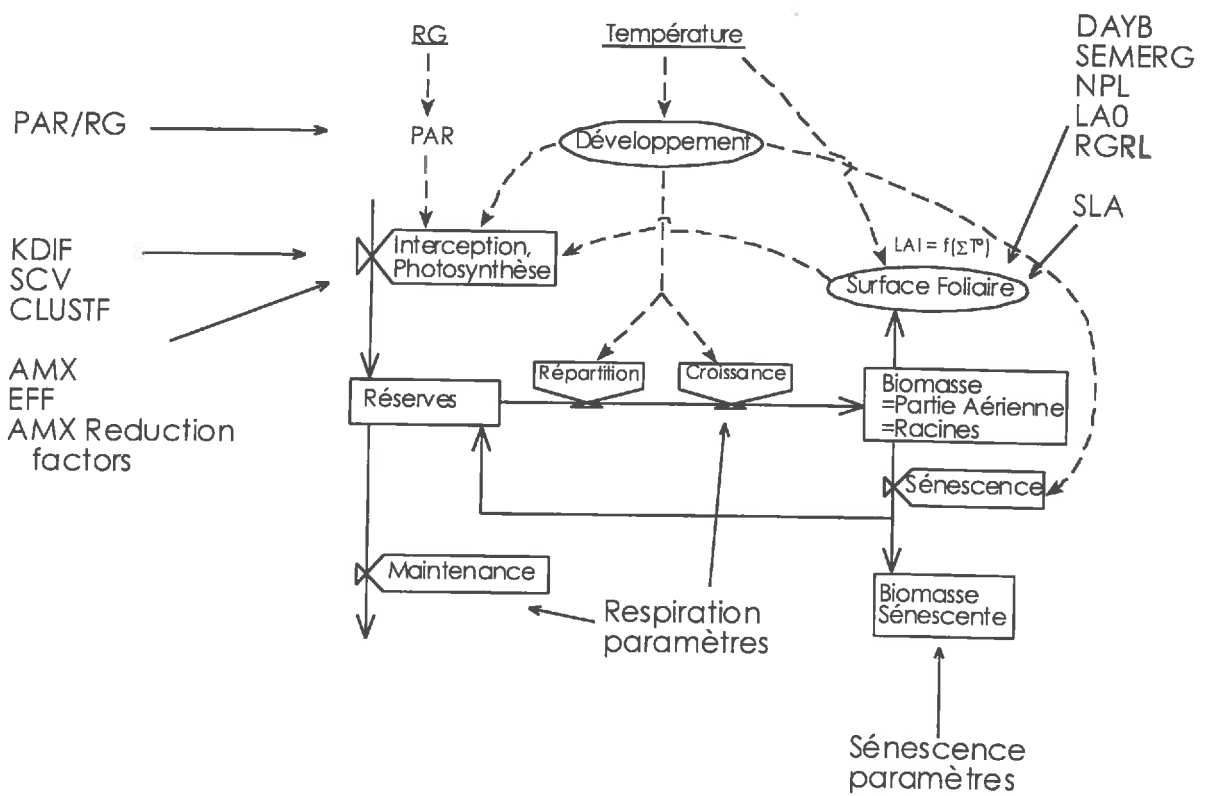


Figure 4-6. Mention des principaux paramètres de SUCROS qui ont été utilisés dans l'analyse de sensibilité.

4.1.1.3 Paramètres de SUCROS

Par rapport à l'objectif que nous poursuivons, les paramètres de SUCROS peuvent être répartis en deux groupes selon les processus concernés et leur possible gamme de variabilité.

Le premier regroupe les paramètres caractéristiques de l'implantation: ceux-ci sont très variables selon les conditions de levée des plantules. Le second regroupe les paramètres qui règlent la croissance autotrophe et nous les considéreront comme peu variables (en rapport des premiers) entre parcelles, en conditions de croissance optimale. En l'absence de références, il est supposé que la variabilité génotypique n'intervient que peu sur ces paramètres. Dans la Figure 4-6 on a ajouté à l'organigramme de SUCROS présenté précédemment les paramètres qui sont concernés par l'analyse. Les paramètres de la levée sont localisés en haut à droite et ceux de la croissance autotrophe dans la moitié inférieure de la figure. Ils sont classés selon les processus dans lesquels ils interviennent.

Paramètres de l'implantation: ils sont généralement spécifiques d'une parcelle, ce sont: la date de la levée et la surface foliaire par plante à la levée, la densité, et le LAI de la jour de la levée. Ces paramètres doivent être déterminées par réétalonnage pour chaque parcelle, particulièrement quand on souhaite simuler la croissance à l'échelle régionale: c'est là que la télédétection intervient. La croissance foliaire ultérieure est simulée par une courbe exponentielle, fondée sur une somme de température (base 3°C) et une vitesse relative de croissance. D'après la littérature, cette vitesse relative pourrait être considérée comme constante (Dürr *et al.*, 1992).

Paramètres de la croissance autotrophe: ces paramètres règlent les fonctionnements biophysiques croissance en phase autotrophe. En conditions quasi optimales, ceux-ci sont considérés comme relativement constant entre plantes et entre parcelles. Pour la betterave, nous n'avons pas une idée claire des caractéristiques des cultivars. La variabilité intra-cultivar pourrait être du même ordre de grandeur que la variabilité inter-cultivar. Nous supposerons, pour une application à l'échelle d'une région (la Picardie par exemple), que tous les cultivars cultivés sont assez similaires, mais pourraient être différents d'une grande région à une autre. Ces paramètres doivent donc être étalonnés pour une région climatiquement homogène. Ils concernent:

- l'absorption du PAR,
- la photosynthèse,
- la répartition des assimilats,
- la croissance des organes,
- la croissance de la surface foliaire,
- la respiration de maintenance et de croissance, et
- la sénescence des organes.

Il doivent être déterminés une fois pour toutes par étalonnage et seront considérés comme fixés pour la suite dans un région donnée.

4.1.2 Analyse de sensibilité de SUCROS

Généralement, la sensibilité du modèle à un paramètre est trouvée en simulant la croissance pour une certaine gamme des valeurs du paramètre. Dans cette analyse, les gammes ont été choisies en fonction des valeurs trouvées dans la littérature, des données acquises pendant les expérimentations faites dans l'unité de recherche. Quand ces renseignements n'étaient pas accessibles, des gammes de variation réalistes autour de la valeur "par défaut" donnée dans SUCROS ont été retenues.

Les données climatiques de 1986 à 1991 ont été utilisées pour introduire l'effet de la variabilité climatique sur la sensibilité. Les années 1986 et 1989 constituent des années bien contrastées du point de vue des températures aussi bien moyennes que cumulées. 89 étant plus chaude que 86.

Deux analyses de sensibilité ont été conduites, soit en analysant l'incidence des variations des paramètres pris individuellement soit en examinant l'incidence des effets cumulés des variations des paramètres pris conjointement (travail réalisé par Brochery, 1996 sur les paramètres d'implantation).

Le jour du démarrage des simulations pour l'analyse pour les paramètres pris individuellement a été le 1 avril (jour 91) et les simulations ont été poursuivies sur 200 jours et donc terminées à la mi-octobre (jour 291). Les simulations concernant l'analyse pour les paramètres pris conjointement ont commencé le 15 avril, elles ont été poursuivies 200 jours comme précédemment. Pour comparer facilement ces deux approches les résultats ont été transformés en valeurs relatives.

Les critères d'évaluation de la sensibilité du modèle ont été principalement choisis pour évaluer l'effet des variations des paramètres sur la vitesse de mise en place du LAI. En effet la vitesse de mise en place du couvert détermine la capacité d'interception du rayonnement, la production potentielle des assimilats, et le rendement final. Donc, les critères retenus sont:

- la somme de températures nécessaire pour atteindre 0.75LAI, stade auquel débute la compétition entre les plantes vis à vis du rayonnement: c'est une façon de décrire la qualité de la levée, pour laquelle de faibles valeurs suggèrent une bonne implantation.
- le LAI maximum atteint et la somme de température nécessaire pour y parvenir (TSUM à LAImax): le LAI maximum est un indicateur de la capacité d'interception du rayonnement et de production des assimilats; ces deux variables dépendent non seulement de la phase de croissance exponentielle, mais aussi de la période après le début de la compétition entre les plantes pour le PAR. La date du début de la compétition, et sa position relative par rapport à la date où le flux d'assimilats vers les feuilles diminue rapidement, détermine pour la suite la croissance foliaire possible.
- le rendement: puisque la croissance nette est cumulative, le rendement est une mesure intégratrice de l'histoire de la croissance de la culture.

Dans les analyses individuelles, on présentera les variations induites sur ces variables par les variations des paramètres en variation relative par rapport aux valeurs obtenues avec les paramètres par défaut; de même, la variation des paramètres est exprimée en % de la valeur par défaut du paramètre.

Tableau 4-1. Paramètres d'implantation utilisés dans les analyses de sensibilité de SUCROS. A) cas où les paramètres varient indépendamment, B) cas où les paramètres varient de façon conjointe.

	Gamme des Paramètres				
	NPL plantes·m ⁻²	LA0 cm ² -plante	SEMERG °C·j (80% de taux final, base 3°C)	RGRL ha(feuilles) ha(sol) °C ⁻¹ Jour ⁻¹	DAYSOW ¹ Jour
A) variation indépendante	6, 8, 11, 11, 12, 14, 16	1, 0.4, 0.81, 1.2, 1.6	80, 100, 120, 140, 180	0.1, 0.12, 0.132, 0.156, 0.1716	60, 75, 20, 105
B) Variation conjointe²					
QI I (rapide)	12.0	2.25	75.0	0.0156	90.0
QI II (moyenne)	9.0	1.51	110.0	0.0156	90.0
QI III (défaut)	11.0	0.84	120.0	0.0156	90.0
QI IV (lente)	6.0	0.49	150.0	0.0156	90.0

note 1: paramètre d'initialisation
note 2: taux de la levée: 95,75,85,50%

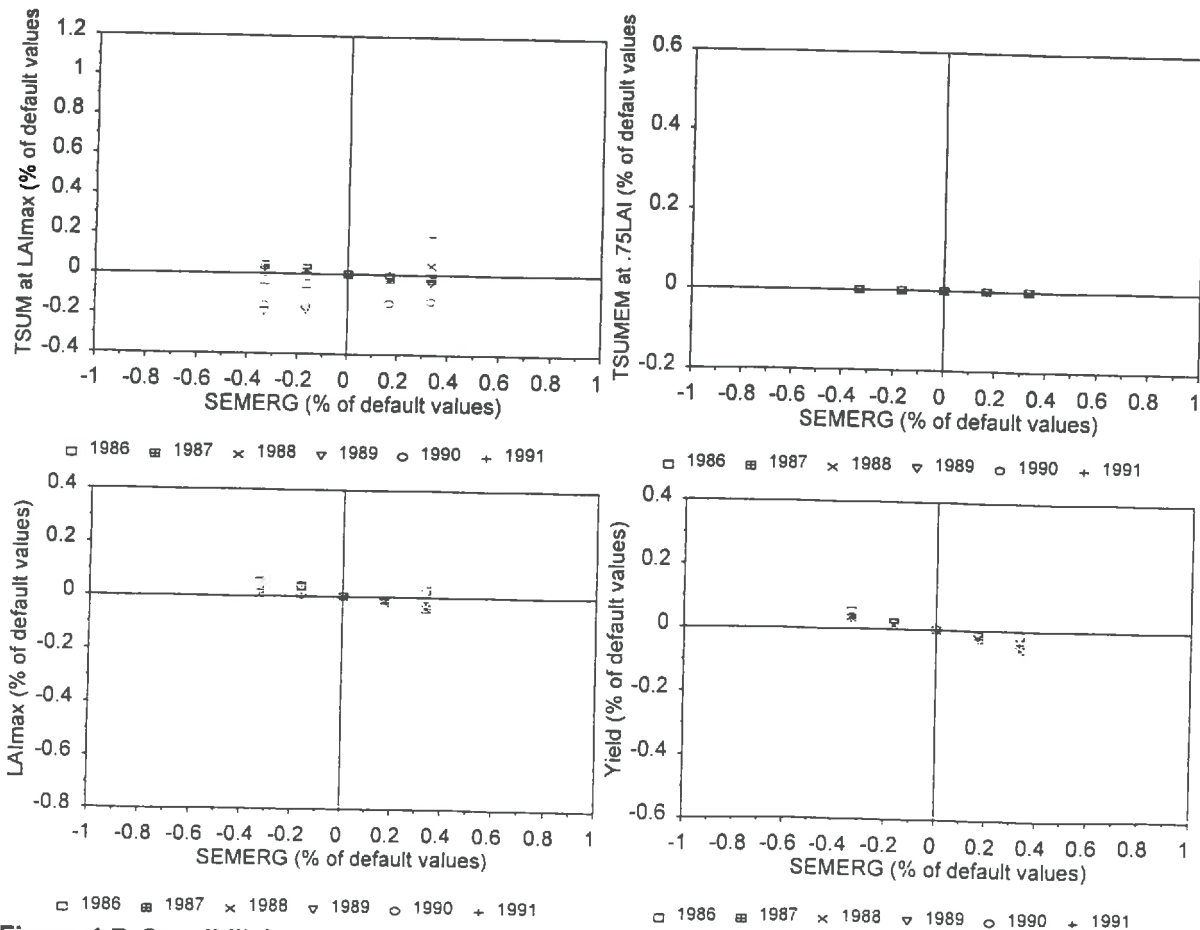


Figure 4-7. Sensibilité de SUCROS au paramètre SEMERG, exprimée à travers les critères décrit en p66.

Ceci dit, certains critères ne sont pas influencés par les variations d'un paramètre soit parce que le paramètre n'influence pas les processus qui affectent les critères, où parce que l'influence du paramètre est tellement faible que le critère n'est pas sensible. Dans ces cas, les résultats concernant ces critères ne sont pas présentés.

4.1.2.1 Paramètres de la levée

Une analyse préliminaire a donc été menée pour chaque paramètre pris indépendamment. Cependant, les paramètres d'un événement "implantation" particulier sont très interdépendants (Dürr *et al.*, 1992). Ainsi pour une levée difficile les paramètres induiront pour les plantules les conditions d'un temps de séjour à l'obscurité plus long que la moyenne, un taux d'émergence final diminué, et des réserves amoindries peu favorables au développement des cotylédons en début de croissance autotrophe. Nous présenterons donc aussi les résultats du travail de Brochery (1996) où l'influence des variations associées de paramètres interdépendants a été analysée.

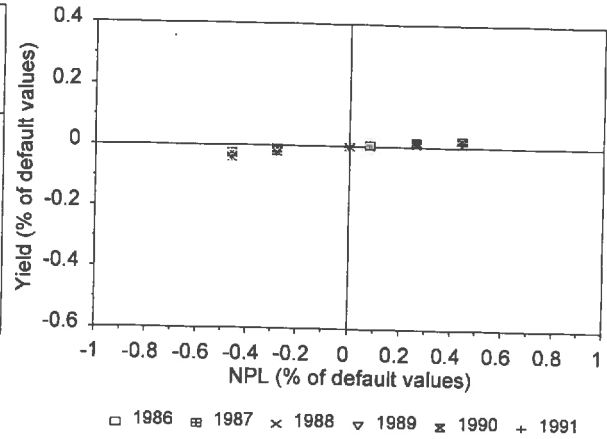
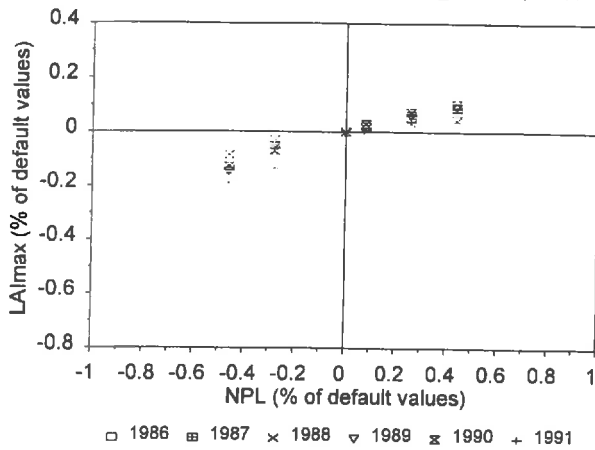
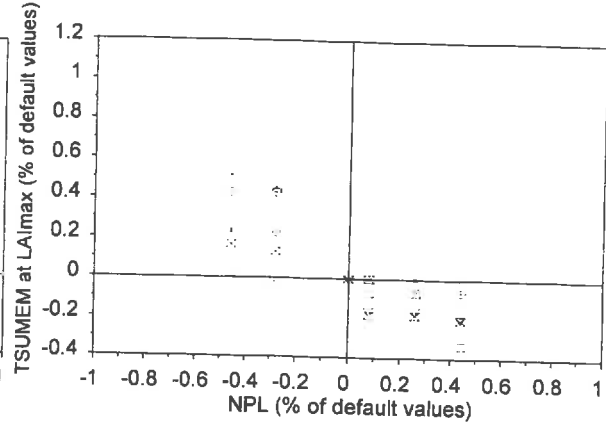
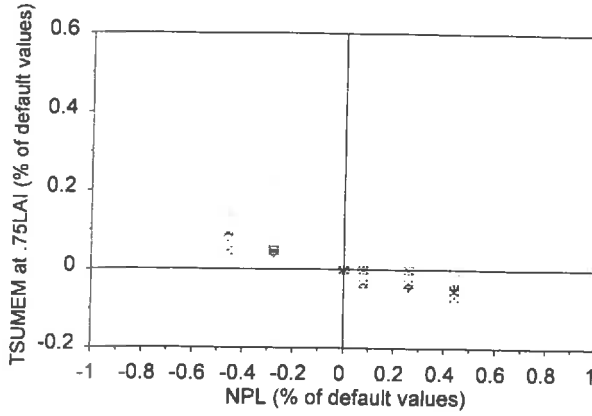
Analyse de sensibilité pour les paramètres considérés indépendamment:

Deux jeux de paramètres pour l'étude de la levée sont listés dans le Tableau 4-1. Ces jeux de valeurs sont destinés aux analyses "individuelles" et "associées" des paramètres. Les gammes de variations des paramètres ont été construites à partir des résultats de Dürr *et al.* (1992), Boiffin *et al.* (1992), Duval et Boiffin (1990) et à partir d'autres données acquises récemment par notre laboratoire. Les gammes de variation de ces paramètres sont importantes, elles reflètent la variabilité naturelle observée au champ. Le paramètre *DAYSO* est utilisé pour initialiser le modèle et n'a pas le même statut que les autres, mais il a un rôle important et doit être déterminé pour faire fonctionner le modèle, il a donc été ajouté aux autres. Le paramètre *RGRL* est aussi mentionné, bien que nous ayons vu qu'il est relativement stable d'une situation d'implantation à une autre.

SEMERG: c'est le premier paramètre utilisé par le modèle pour déterminer le jour de la levée. Le modèle est peu sensible quelles que soient les valeurs. Le critère TSUM à 0.75LAI n'est pas intéressant ici car la croissance foliaire précoce, qui est une fonction de la somme de température, est initialisée à partir du moment déterminé par *SEMERG*, c'est donc toujours la même "distance" à partir de la date de levée qui est décrite par ce paramètre. Pour des raisons similaires, les deux critères du LAImax (le maximum et la somme de température au maximum) ne peuvent pas révéler une sensibilité du modèle à ce paramètre. La faible variabilité enregistrée découle directement de la faible variabilité climatique interannuelle. Seul le rendement est affecté par *SEMERG*. Les résultats de l'analyse sont montrés à la Figure 4-7. Cependant le rendement a une faible relation négative avec le paramètre. Un *SEMERG* élevé a pour effet de retarder la levée et donc de réduire la durée de la croissance. Le modèle reste peu sensible à ce paramètre.

NPL et LA0: ces deux paramètres déterminent la surface foliaire initiale (*LAI0*) et sont très variables selon la cinétique de semis-levée. Ils sont traités ensemble car ces deux paramètres conditionnent tous deux le LAI initial au jour de la levée, et ils ont donc le même comportement. Cependant *NPL*

NPL



LAO

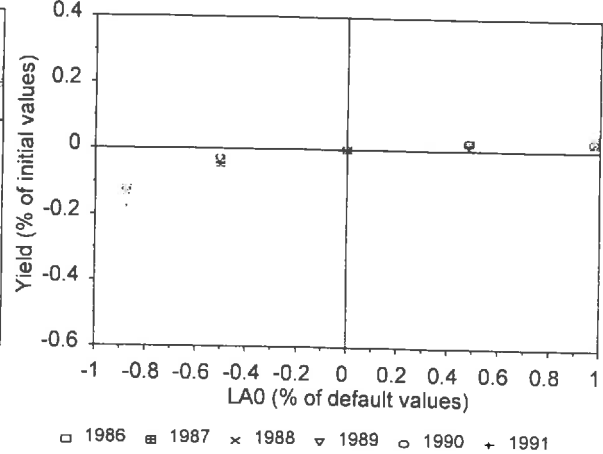
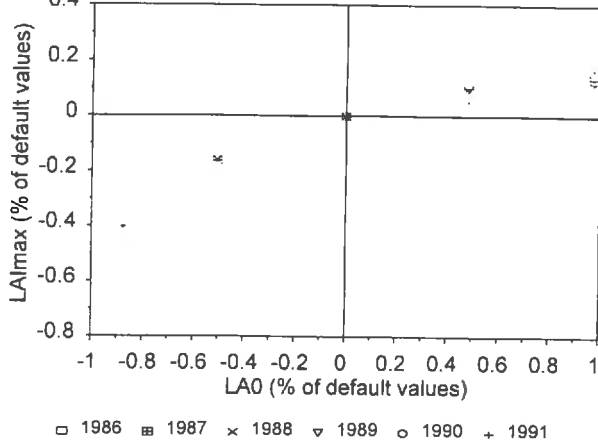
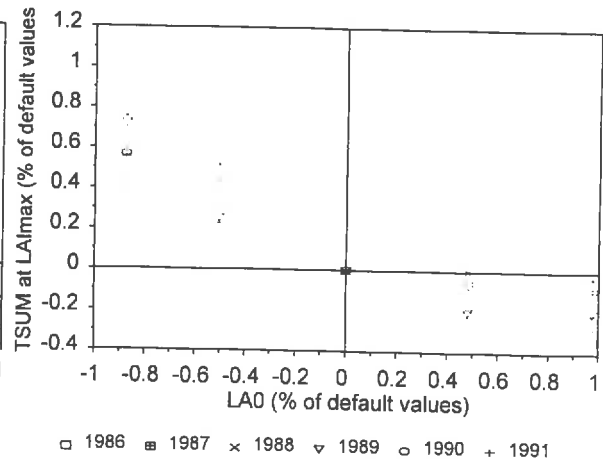
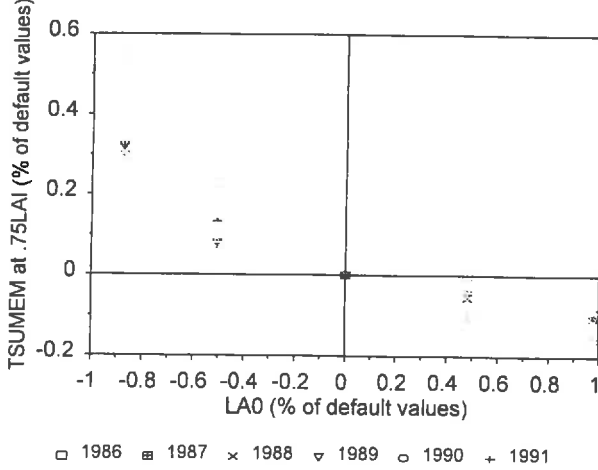


Figure 4-8. Sensibilité de SUCROS aux paramètres NPL et LAO (cf. critères p.66).

présente une variabilité moins importante que $LA0$, mais toujours significative. Les résultats sont présentés à la Figure 4-8. Pour les quatre critères, le modèle est sensible à ces paramètres. Puisque ils conditionnent la phase exponentielle de l'évolution du LAI en déterminant les valeurs de LAI (Eq. 4-1), c'est logique qu'ils jouent fortement sur le critère TSUM pour $0.75LAI$. L'année 1986 est exceptionnelle car ce critère prend une valeur presque deux fois plus élevée que les autres années, à cause des faibles températures rencontrées qui ont pu affecter la vitesse de croissance et donc celle de la canopée. Le critère TSUM à LAI_{max} est nécessairement très sensible car il dépend à l'évidence de la forme générale de la courbe du LAI. Pour les quatre critères, le modèle s'est révélé plus sensible aux faibles qu'aux fortes valeurs des paramètres NPL et $LA0$. Le LAI maximum et la somme de température nécessaire pour atteindre cette valeur sont fortement diminués par les faibles valeurs des paramètres. Les fortes valeurs des paramètres n'ont que peu d'incidence car l'absorption du PAR commence à plafonner pour un LAI de l'ordre de 3-4, en effet la production des assimilats ne varie pas linéairement avec le LAI. Donc, le critère rendement reste donc peu sensible aux accroissements de $LA0$.

DAYSOW: Ce paramètre représente la date du jour de semis (figures non montrés). Il est nécessaire pour initialiser le modèle et n'a pas le même statut que les autres paramètres qui conditionnent les différentes fonctions du modèle. Mais pour utiliser le modèle il doit être connu ou estimé pour chaque parcelle, alors qu'il n'est pas aisément disponible. Il a une action similaire à celle de *SEMERG*, mais la date du jour de semis peut varier beaucoup plus. Ses variations dépendent du choix de l'agriculteur dans une gamme des possibles relativement étendue (de l'ordre de 4 à 6 semaines pour une année donnée dans la région Picardie), à la différence des fluctuations potentiellement plus réduites des paramètres intervenant dans les processus biologiques. Ce paramètre influence directement l'installation du couvert foliaire et les possibilités de valorisation du rayonnement: on constate que le critère rendement y est assez sensible. Cependant cet effet peut être pondéré par les conditions climatiques ultérieures ainsi en 1987 les semis précoces ont eu peu d'effet à cause des faibles températures et rayonnements, enregistrées notamment au printemps. Dans de telles conditions la culture n'a pu valoriser l'allongement du cycle de croissance. Par contre, les années 1989 et 1990 furent relativement tempérées et bien ensoleillées permettant de valoriser une date de semis précoce.

Analyse des paramètres associés dont la variation est conjointe:

Dans la réalité, les paramètres ne sont pas déterminés de façon indépendante les uns des autres: leurs valeurs dépendent des conditions de réalisation de la phase d'implantation. C'est pourquoi Brochery (1996) a réalisé une analyse de sensibilité des paramètres conjoints. À partir des résultats de Boiffin *et al.* (1992) et Dürr *et al.* (1992) (cf. Chapitre 2), elle a établi des jeux de paramètres qui représentent trois types d'implantation: rapide (1), moyenne (2), et lente (4). Les valeurs "par défaut" de SUCROS (3) sont incluses (cf. Tableau 4-1): alors qu'elles ont été définies indépendamment, les valeurs des 3 types d'implantation encadrent bien les valeurs par défaut de SUCROS qui représentent bien une situation moyenne.

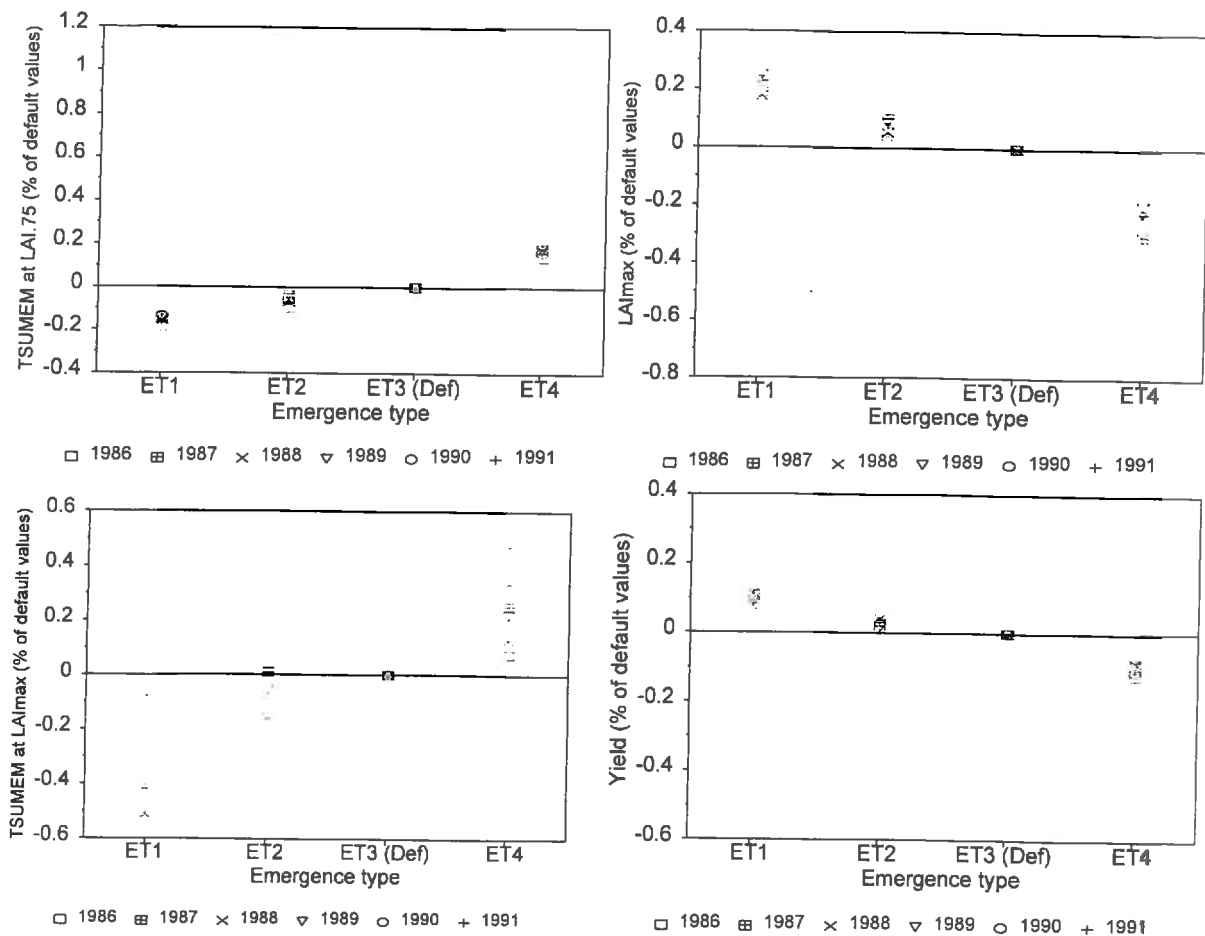


Figure 4-9. Sensibilité de SUCROS aux paramètres d'implantation: quatre types d'implantation (ET1=rapide, ET2=moyenne, ET3= valeurs défaut, ET4=lente, cf. Tableau 4-1 et critères p.66).

Les résultats des analyses de Brochery sont présentés dans la Figure 4-9 où les quatre types d'implantation sont évalués à l'aide des quatre critères définis plus haut. Pour faciliter leur interprétation, les critères concernent aussi les paramètres "par défaut" de SUCROS comme pour les paramètres analysés individuellement.

TSUM pour 0.75LAI: Selon les types d'implantation on observe des variations de 15 à 20 jours dans la durée de la phase exponentielle de croissance. Cet écart induira à terme une variabilité de la position du cycle cultural par rapport aux conditions climatiques: PAR incident et température principalement.

LAI_{max} et TSUM à LAI_{max}: le niveau atteint par le LAI_{max} est fortement influencé par le type d'implantation. Ainsi, l'implantation rapide s'accompagne d'un développement plus rapide de la canopée que pour les autres types d'implantation. Les valeurs du critère TSUM à LAI_{max} sont relativement dispersées, la définition du plateau LAI_{max} est délicate (les processus de sénescence des feuilles pouvant interférer), mais la tendance est à l'accentuation du retard des mauvaises implantations qui atteignent des niveaux de LAI_{max} plus faibles.

Rendement: Les rendements constatés pour les levées rapides et lentes s'écartent de 10% du rendement des implantations moyennes et de la courbe "par défaut". Entre les rendements des levées rapide et lente il y a 20%.

Les résultats montrent que le développement de la canopée est très sensible aux paramètres de l'émergence. Les effets précoces trouvés pour la mise en place du LAI sont transmis tout au long de la saison, avec des influences très évidentes sur le LAI maximum accessible et le rendement qui s'en suit. L'analyse de sensibilité montre donc le besoin de bien déterminer ces paramètres.

4.1.2.2 Paramètres de la croissance autotrophe

La sensibilité du modèle aux paramètres des différents processus biophysiques de la croissance autotrophe est analysée pour indiquer ceux qui contribuent significativement à la croissance de la culture. Cette étude de sensibilité nous aidera à déterminer quels sont les paramètres prioritaires dans l'étalonnage ultérieur. Les paramètres sont analysés selon leur apparition dans les différents processus biophysiques (Figure 4-6). Les processus examinés sont l'absorption du rayonnement, la photosynthèse, et la production du LAI.

L'absorption du PAR:

KDIF, SCV: Le paramètre d'atténuation du PAR, *KDIF*, peut s'écarter considérablement de la valeur par défaut de 0.69, selon la distribution des angles foliaires. Des canopées de feuilles érectophiles ont des *KDIF* plus faibles qui augmentent quand les feuilles deviennent planophiles. Monteith (1969) et Spitters *et al.* (1989) ont présenté des valeurs typiques de *KDIF* entre 0.4 et 0.7 pour les monocotylédones. Compte tenu de la canopée dense et de la grande taille des feuilles de betterave, le

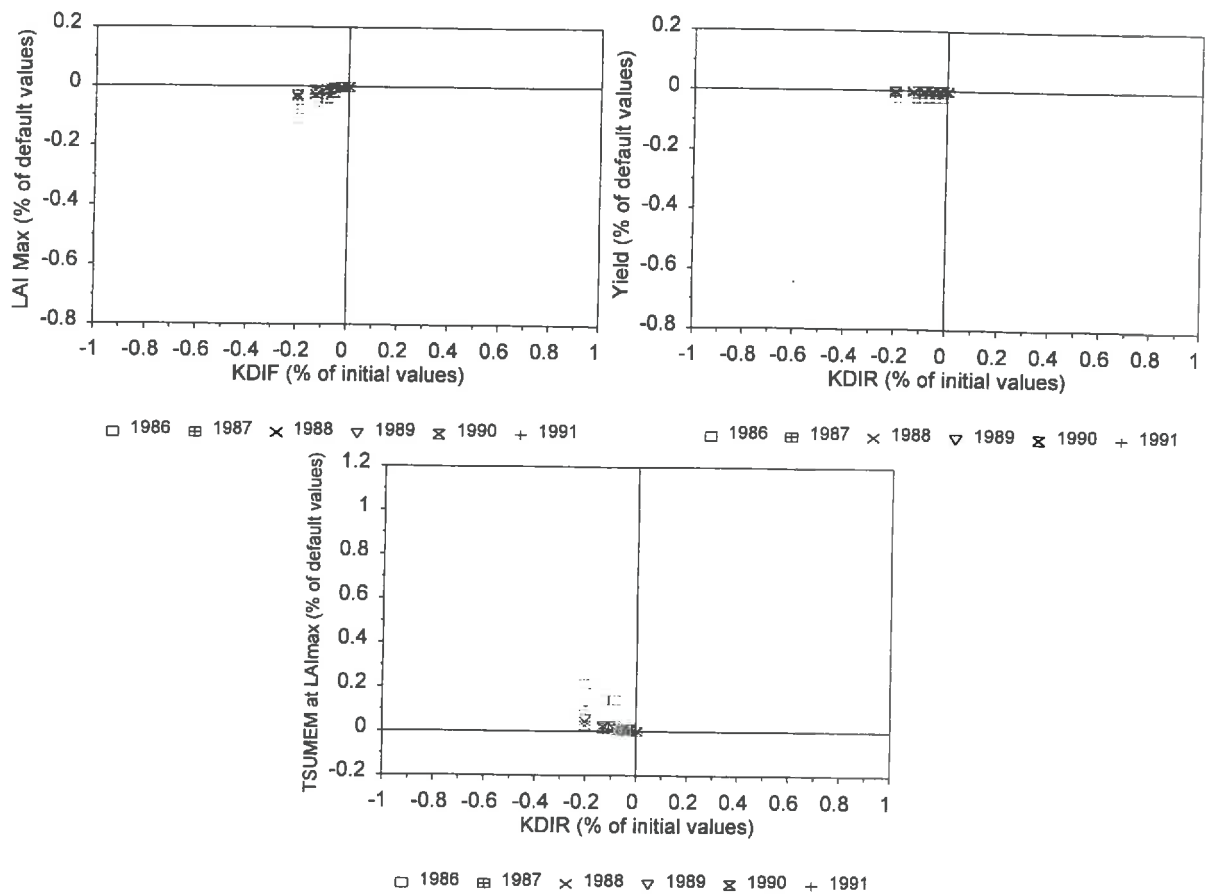


Figure 4-10. Sensibilité de SUCROS au paramètre KDIF (cf. critères p.66).

KDIF devrait être élevé, on a donc retenu 0.55, 0.5, 0.65, 0.67, et la valeur par défaut 0.69 comme valeurs pour l'analyse. La valeur par défaut de *SCV* est de 0.2, mais elle dépend des propriétés optiques des feuilles, qui dépend notamment de l'état hydrique et du statut azoté de la culture. En conditions optimales, seulement une faible variabilité est attendue, on a donc pris pour l'analyse une gamme de $\pm 15\%$ autour de la valeur par défaut.

KDIF et *SCV* influencent l'absorption du PAR et donc en partie, la capacité de production. Ils n'ont pas d'influence pendant la croissance précoce du LAI parce que la croissance foliaire est essentiellement régie par la température. Le LAImax et la TSUM pour LAImax sont légèrement affectés par de faibles valeurs de *KDIF* (Figure 4-10) parce que les fortes valeurs de LAI permettent déjà le maximum d'absorption du PAR. Par conséquent, le rendement est peu affecté. Ce phénomène est encore plus clairement mis en évidence pour les *SCV* auxquels le modèle n'est pas sensible (non montré).

Photosynthèse brute: Les deux paramètres qui décrivent la relation non linéaire photosynthèse-APAR sont la pente initiale, *EFF*, et *AMAX* le taux maximum de photosynthèse en conditions optimales (cf. Eq. 4-3), qui dépend du taux potentiel *AMX*. Le paramètre *EFF* est souvent considéré comme relativement constant, et en tout cas moins variable que le paramètre *AMX* qui varie au cours de la saison en fonction de l'âge des feuilles (Hôdanova, 1979; 1981), et de la température (Norman et Arkebauer, 1991). La valeur par défaut de *EFF* dans SUCROS est de 0.50 ($\text{kg CO}_2\cdot\text{j}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{heure}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$). D'anciennes version de SUCROS ont utilisé *EFF*=0.45.

Considérant les données de la littérature, nous avons utilisé les valeurs de 0.4, 0.45, et 0.5 pour *EFF* (Spitters et Kramer, 1986; Spitters, 1989; Hôdanova, 1979) et de 30.0 à 50.0 CO_2 ($\text{kg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}[\text{feuille}]\cdot\text{heure}^{-1}$) pour *AMX*. Il nous est apparu que 0.50 était un maximum, quelque soit l'âge des feuilles (Hôdanova, 1979).

Comme avec *KDIF* et *SCV*, la croissance foliaire précoce n'est pas affectée par la production de matière sèche, donc *AMX* et *EFF* n'affectent pas le critère de TSUM avant 0.75LAI. Cependant, LAImax et le rendement sont sensibles à ces deux paramètres (Figure 4-11 et Figure 4-12). Le LAImax baisse de 10% à 25% pour des faibles valeurs d'*AMX*. La variabilité inter-annuelle pour LAImax et TSUM à LAImax augmente quand *AMX* diminue, sans répercussions pour le rendement. Les effets sont semblables pour *EFF*, mais avec moins de variabilité inter-annuelle. LAImax et rendement sont un peu moins sensibles que pour *AMX*, probablement parce qu'une grande partie de l'assimilation au cours du cycle est réalisée pour des forts niveaux de PAR absorbé. Les fortes sensibilité du modèle à ces paramètres requiert un bon étalonnage pour que le LAI et le rendement soient bien simulés. Ainsi par exemple, une erreur de 20% sur *AMX* provoque une erreur de 10% sur le rendement.

Production de surface foliaire:

Au delà du stade 0.75LAI, la croissance journalière du LAI devient une fonction de la production de matière sèche des feuilles vertes. Pour convertir la masse en surface un coefficient ou surface spécifique (*SLA*, $\text{ha}(\text{feuilles})\cdot\text{kg}^{-1}(\text{feuilles})$) est utilisé. Pour la betterave, Damay (comm. pers.) a

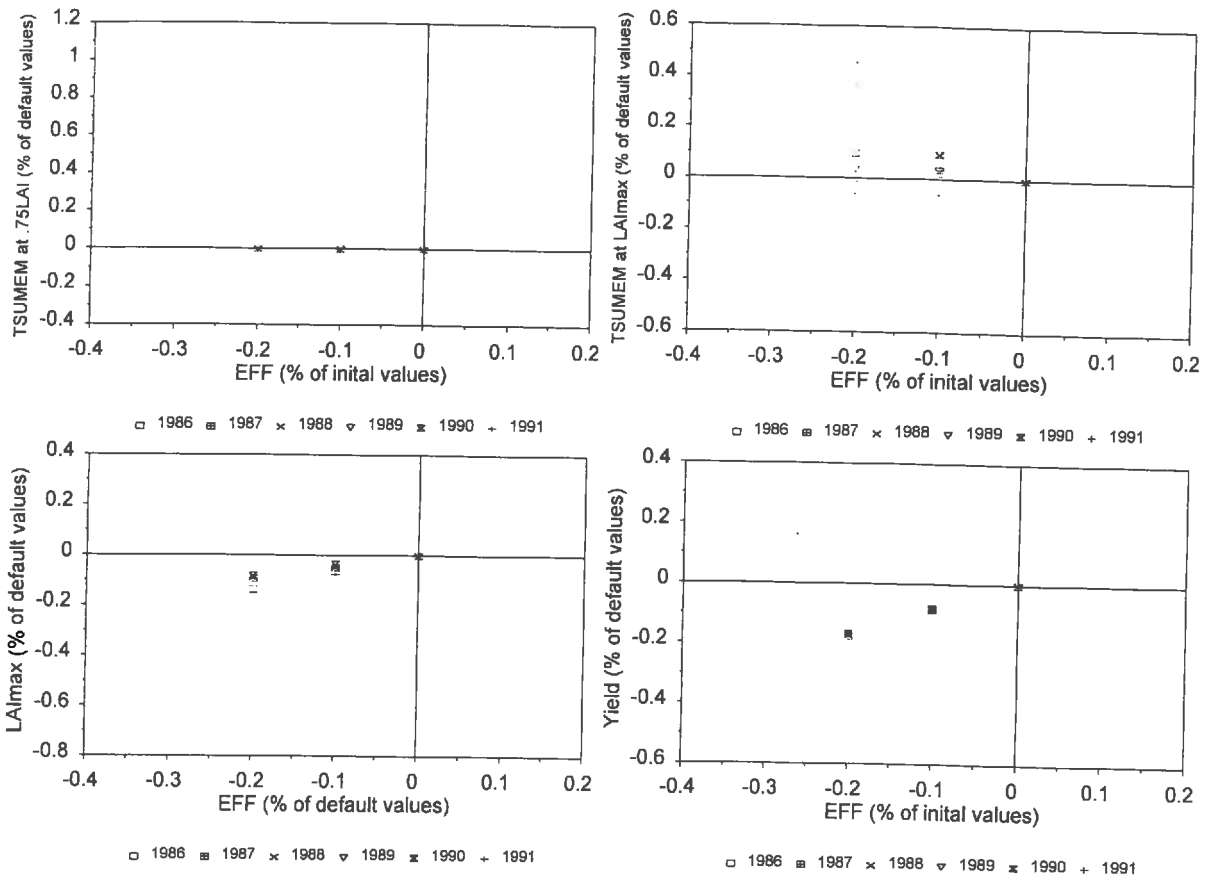


Figure 4-11. Sensibilité de SUCROS au paramètre EFF (cf. critères p.66).

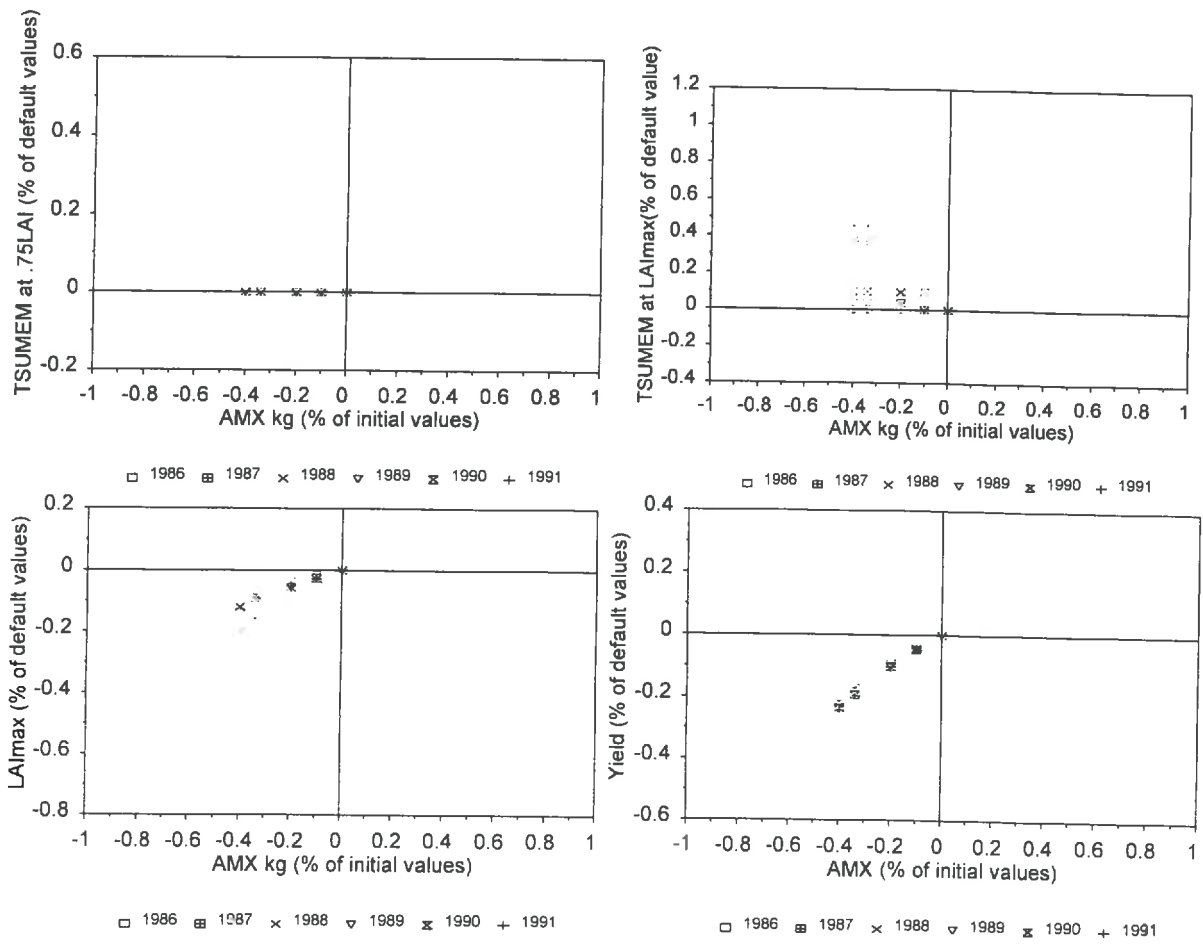


Figure 4-12. Sensibilité de SUCROS au paramètre AMX (cf. critères p.66).

mesuré ce rapport pour des feuilles individuelles et pour trois saisons différentes. Ces données montrent une variabilité relativement élevée (entre 0.0014 et 0.0025) selon les conditions de culture.

Pour l'analyse de sensibilité, cette gamme a été utilisée, ainsi que la valeur par défaut de SUCROS de 0.002. La variabilité de SLA n'affecte pas seulement la croissance nette du LAI (Figure 4-13), mais également la production de la culture via l'interception du PAR. Il est montré que LAI_{max} est très sensible au SLA. Il y a peu de variabilité inter-annuelle pour LAI_{max} et le rendement mais elle est très importante pour TSUM à LAI_{max}. Le rendement est quelque peu sensible au SLA. Il apparaît que l'augmentation du rendement va plafonner rapidement pour des valeurs de SLA supérieures à 0.0025 mais la sensibilité est relativement constante pour de faibles valeurs.

Autres paramètres:

D'autres paramètres ont été analysés en plus de ceux présentés ci-dessus. Ils recouvrent les paramètres de la respiration d'entretien des racines de stockage, de la redistribution des assimilats des organes sénescents, et de la sénescence des feuilles causée par les ombrages mutuels ou par l'âge. Ces paramètres a eu soit aucun effet, soit des effets insignifiants, sur les quatre critères. La non sensibilité du modèle est en partie due au fait que les variations des paramètres ne mobilisent que de très faibles quantités de masse ou d'énergie. Une autre raison a été que certains processus intervenant tard dans le cycle les critères sont soit inopérants soit ne sont pas sensibles. En effet, les conséquences des processus tardifs, comme la sénescence et la redistribution des assimilats, sur l'évolution de la croissance des organes ne sont pas suffisamment perceptibles.

D'autres paramètres, tels que les fonctions de répartition des assimilats n'ont pas été étudiés

4.1.3 Étalonnage de SUCROS

L'estimation de certains des paramètres de SUCROS a été réalisée par des mesures directes, mais la majorité des paramètres et processus biophysiques a été estimée par l'ajustement des simulations aux données observées. Ces données peuvent être spécifiques à un sous-module de SUCROS (par exemple l'absorption du PAR, ou la photosynthèse) ou concerner globalement la croissance de la culture.

Dans la plupart des cas, les sous-modules concernés étaient extraits de SUCROS et traduits dans S-PLUS (StatSci, 1993), langage de programmation de haut niveau qui facilite la manipulation des données et l'ajustement de paramètres à des mesures spécifiques.

L'ensemble des données utilisées pour l'estimation des paramètres soit à partir de mesures directes soit à partir d'ajustements sont décrites dans le Chapitre 3.

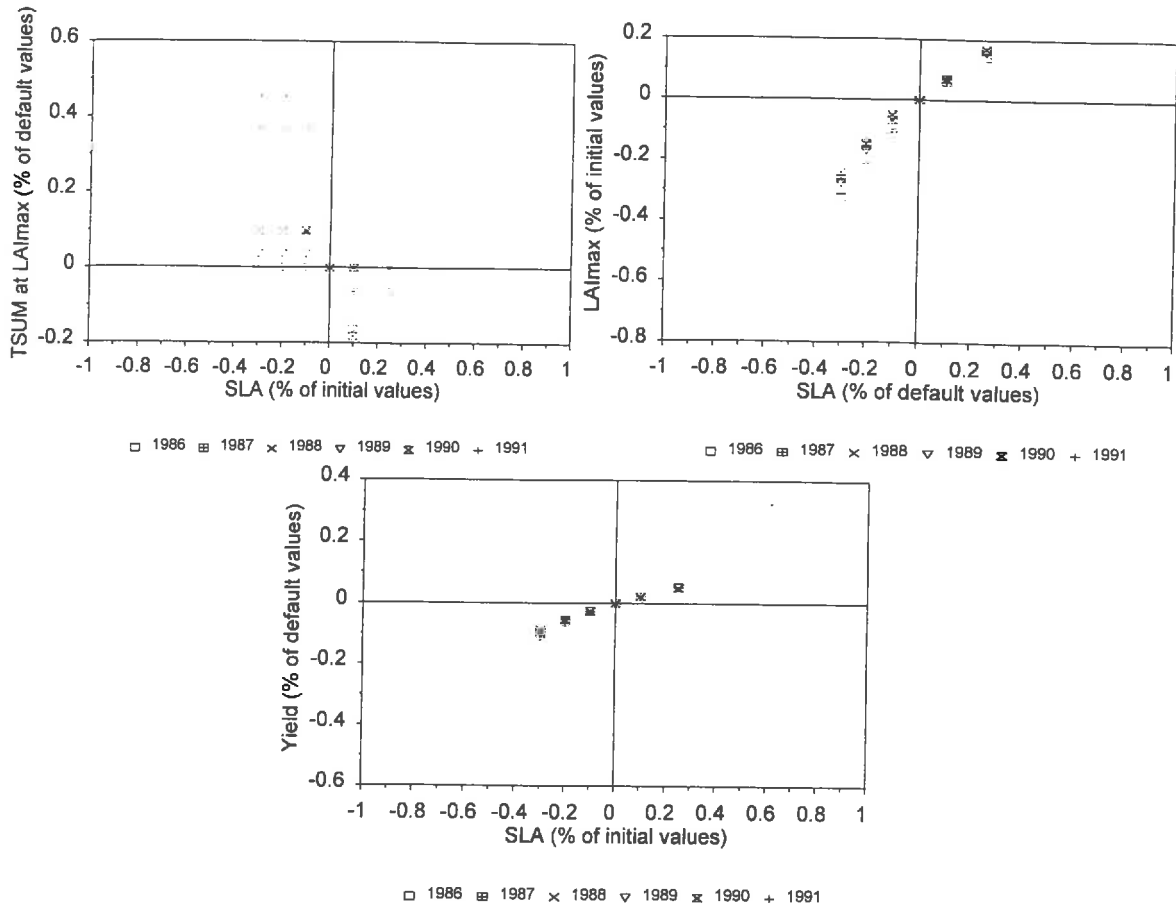


Figure 4-13. Sensibilité de SUCROS au paramètre SLA (cf. critères p.66).

4.1.3.1 Détermination des paramètres de la levée

SEMERG: Le modèle n'utilise qu'un jour moyen pour la levée de la culture, défini par une somme de température (base 3°C) depuis le semis. La levée est en réalité un événement dynamique; nous avons défini le jour de la levée comme le moment où 80% du nombre final des plantes ont levé. Comme on le voit dans la Figure 3-4, ce seuil correspond à la fin de la levée rapide initiale, et au début d'une période de ralentissement asymptotique du taux d'émergence jusqu'à 100% du nombre final des plantes levées. Il correspond en fait à un domaine où l'estimation d'un couple taux de levée-somme de température est optimale. En effet la difficulté de définir un jour de levée pour un taux donné provient de ce que, du fait de la pente de la relation, avant 80% on fait une erreur importante sur l'estimation du taux à une somme de température donnée alors qu'au delà on estime imprécisément le taux d'émergence pour une somme de température donnée. Dans nos conditions expérimentales, avec le critère de 80% de la levée finale, le jour de levée moyen correspond au jour 120, et le paramètre *SEMERG* est égal à 102°Cjours.

NPL: La densité finale de la levée a été déterminée par le comptage des plantules. La levée moyenne a été 10.8 plantes/m², soit un taux de levée finale de 72.9%.

LA0 et RGRL: La croissance précoce du LAI est exponentielle avec la somme de température (Eq. 4-1). Nous avons vu (Chapitre 2) que *RGRL* pourrait être constant (0.0156cm·cm⁻¹·(°C·j)⁻¹). Une surface foliaire hypothétique d'une culture quand le *SEMERG* vaut 102°C·j ne peut pas être mesurée directement, mais pourrait être calculé en utilisant plusieurs mesures précoces de LAI. Le *LA0* a été déterminé par optimisation de manière à ajuster la courbe du LAI aux LAI observés. A cet effet en prenant les valeurs de *SEMERG*, *NPL*, et *RGRL* estimées ci-dessus, on a minimisé la somme des carrés des écarts entre les sept premières mesures du LAI et la courbe des LAI simulés par l'Eq. 4-1 (voir aussi plus loin, Chapitre 6). L'ajustement a donné pour *LA0* la valeur de 0.876 cm⁻²·plante.

4.1.3.2 Etalonnage des modules de la croissance autotrophe

Les principaux processus biophysiques à étalonner sont l'absorption du PAR dans la canopée, la photosynthèse, la répartition des assimilats, le *SLA*. Pour les paramètres qui ne pouvaient pas être mesurés ou évalués directement, l'estimation a été réalisée à partir des mesures de biomasse globale; ce fut le cas avec la répartition des assimilats. De même parce que les mesures ponctuelles de la photosynthèse n'étaient pas suffisantes, l'étalonnage du modèle décrivant ce processus dans SUCROS fut réalisé avec des mesures globales.

Etalonnage par mesures directes

Absorption du PAR: la modélisation de l'absorption instantanée du PAR (APAR) dans la canopée a été comparée aux mesures instantanées enregistrées tout au long de la culture. Le sous-module d'absorption de SUCROS a été extrait et importé sous S-PLUS. L'utilisation des paramètres par défaut a conduit à une sous-estimation de APAR. Pour les faibles valeurs du LAI les mesures sont variables à cause de la forte influence de la réflectance du sol et des erreurs sur les mesures des termes du bilan

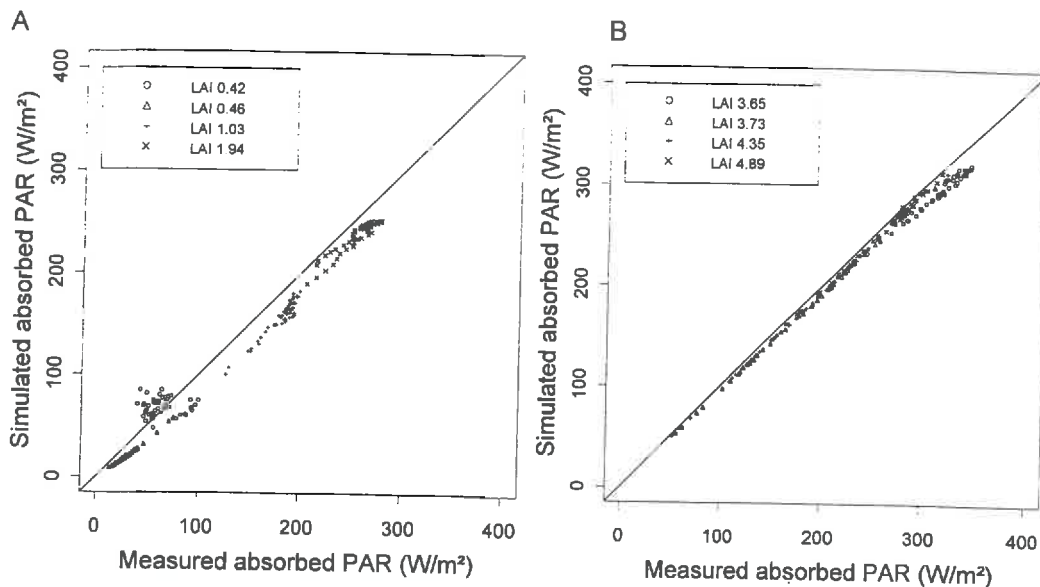


Figure 4-14. Comparaison du PAR absorbé mesuré et simulé (paramètres par défaut) pour A) les faibles LAI, et B) les forts LAI.

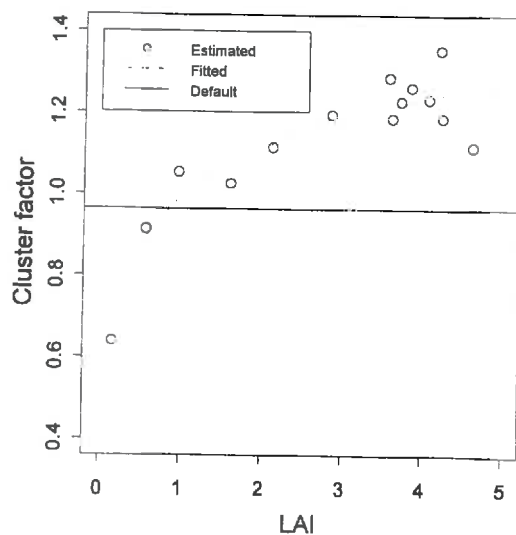


Figure 4-15. Valeurs estimées de paramètre d'agrégation des feuilles, CLUSTF, à partir des mesures de PAR absorbé en fonction du LAI et ajustement par une fonction exponentielle. La valeur par défaut de CLUSTF dans SUCROS est figurée par la ligne —.

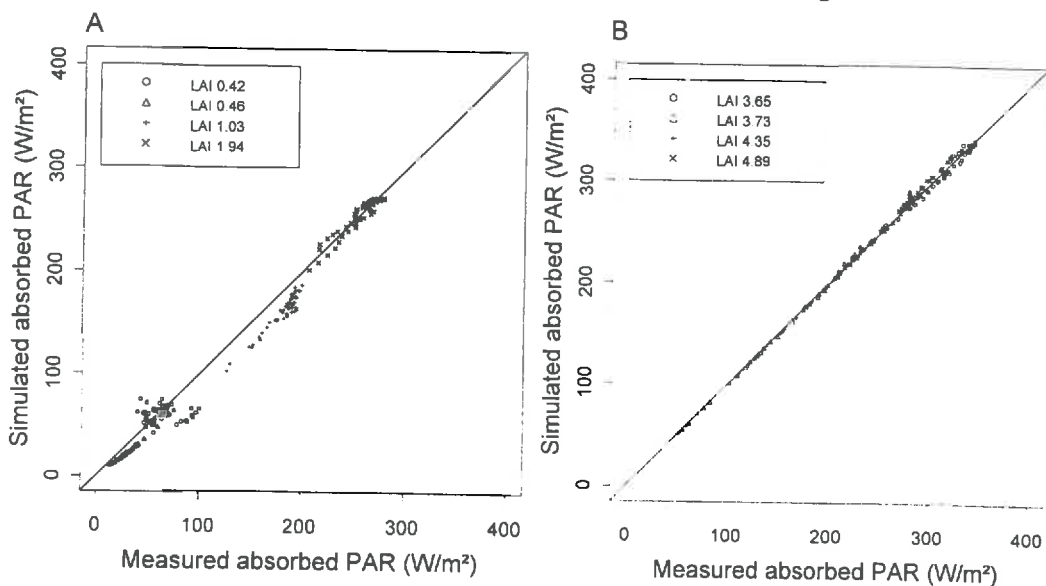


Figure 4-16. Comparaison du PAR absorbé mesuré et simulé après l'ajustement de CLUSTF pour A) les faibles LAI, et B) les forts LAI.

radiatif (Figure 4-14A). Pour les faibles niveaux du LAI, les valeurs du APAR restent faibles, même quand les plantes sont bien ensoleillées. Quand le LAI est plus important (B), APAR est du même ordre de grandeur que le PAR incident. On note une sous-estimation d'APAR pour les faibles niveaux du LAI, mais ce biais diminue quand le LAI augmente (i.e. les mesures s'approchent de la droite 1:1). L'évolution de ce biais suggère qu'il pourrait être dû à une évolution des caractéristiques de la canopée au cours du cycle.

La validité de l'hypothèse d'une canopée homogène semble ne pas être toujours respectée. La betterave est semée selon des rangs bien séparés. Pendant les stades précoces, les feuilles sont agrégées (regroupement en paquets) le long du rang, la dispersion et l'homogénéité de répartition augmente au cours du développement de la canopée. Pour cette raison, nous avons décidé d'ajuster le facteur d'agrégation (*CLUSTF*) pour éliminer ce biais, et calculer le paramètre *KDIF* à partir de *CLUSTF*. Le paramètre *SCV* a été gardé constant. Nous avons utilisé pour cela les mesures de APAR (instantané), regroupé sur 2 ou 3 jours. La Figure 4-15 représente l'évolution de *CLUSTF* avec le LAI et une courbe ajustée de la forme:

$$CLUSTF = a + b \cdot \ln(LAI)$$

Eq. 4-4

Les valeurs de *CLUSTF* sont inférieures à 1.0 pour les canopées jeunes montrant que l'agrégation des feuilles est importante, le coefficient d'atténuation est plus faible. Quand la canopée se développe, *CLUSTF* augmente, indiquant moins d'agrégation, une canopée plus homogène, et un coefficient d'atténuation plus important.

La Figure 4-16 présente les résultats des simulations du APAR pour les mêmes jours que la Figure 4-14 mais avec le facteur *CLUSTF* ajusté. La prise en compte de l'évolution de *CLUSTF* a été particulièrement efficace pour les journées où le LAI atteint des niveaux intermédiaires (Figure 4-16A: entre 0.46 et 1.94). Ces corrections ne sont pas parfaites, mais permettent de s'affranchir de l'hypothèse d'homogénéité de la canopée tout au long du cycle, implicite dans le sous-module. Après étalonnage, ce sous-module décrit très bien le LAI pour les valeurs élevées (Figure 4-16B).

SLA: Les mesures de surface spécifique sont présentées dans la Chapitre 3. Nous avons trouvé que les valeurs mesurées sont, en général, proches de la valeur par défaut de SUCROS. Les mesures effectuées au cours de la saison montrent que la *SLA* est variable entre plantes, entre feuilles, et au cours du temps (semaines), mais la moyenne est bien de l'ordre de $0.002 \text{ ha(feilles)} \cdot \text{kg(feilles sèche)}^{-1}$.

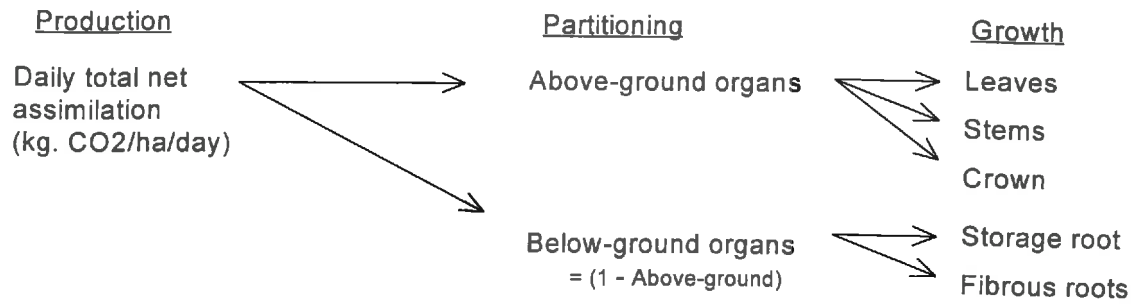


Figure 4-17. Schéma de la répartition des assimilats dans SUCROS.

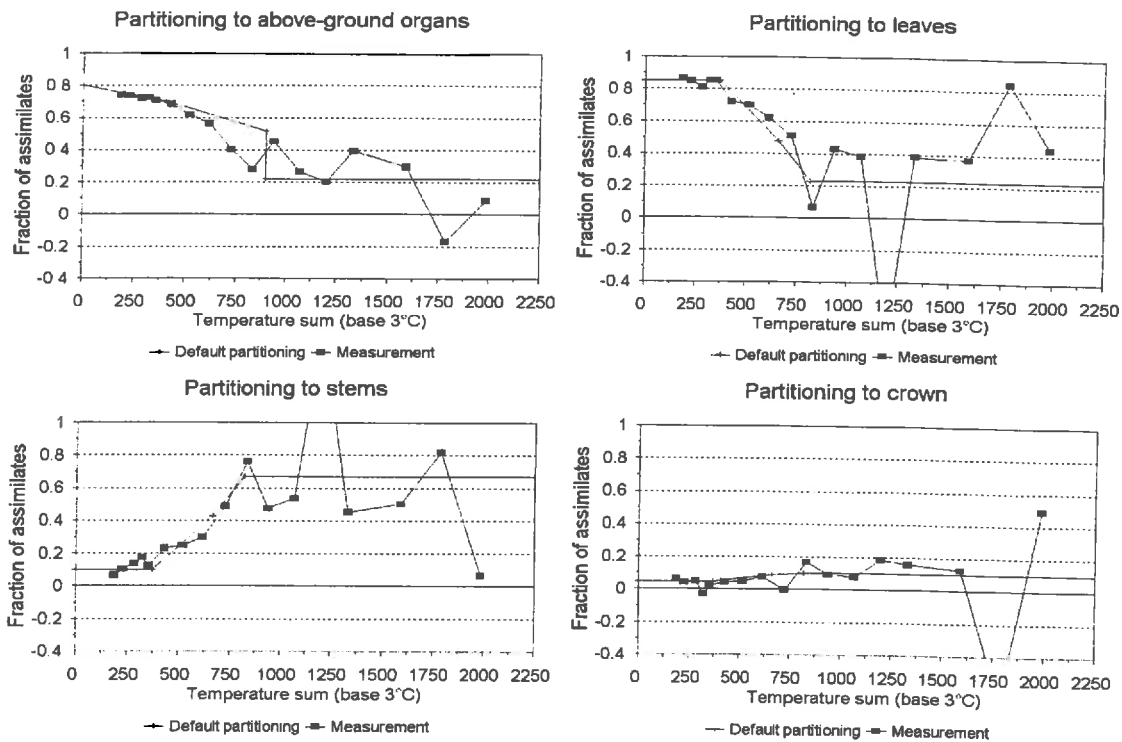


Figure 4-18. Coefficients de répartition des assimilats vers les organes aériens, calculés avec les paramètres par défaut (lignes) ou estimés d'après les mesures de biomasse des organes (carrés).

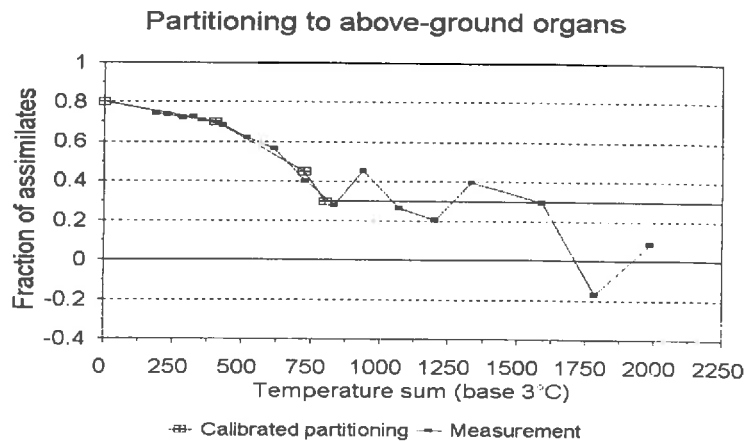


Figure 4-19. Nouvelle fonction de répartition des assimilats vers les organes aériens. Les carrés plein représentent les valeurs estimées d'après les mesures de biomasse des organes.

Étalonnage par mesures globales de la biomasse

Répartition des assimilats: Les assimilats produits chaque jour sont répartis entre les organes. Les assimilats sont d'abord répartis entre les organes aériens et souterrains. Ensuite, cette répartition se poursuit au delà entre les autres organes (Figure 4-17). Le taux de la répartition vers les organes dépend du stade de développement de la culture, mesuré par la somme de température. La croissance aérienne est initialement prioritaire, mais cette priorité diminue rapidement jusqu'à 1000°C (base 2°C), la plupart des assimilats est alors dirigée vers les racines.

Les coefficients de répartition ont été déterminés à partir des variations, entre prélèvements consécutifs, de la masse de chaque organe relativement à la variation de la masse totale. La répartition vers la partie aérienne (F_{aer}) a ainsi été calculée par:

$$F_{aer} = \Delta \text{masse partie aérienne} / \Delta \text{masse totale}$$

et la répartition entre les organes aériens par:

$$F_{aer} = \Delta \text{masse organe} / \Delta \text{masse partie aérienne}$$

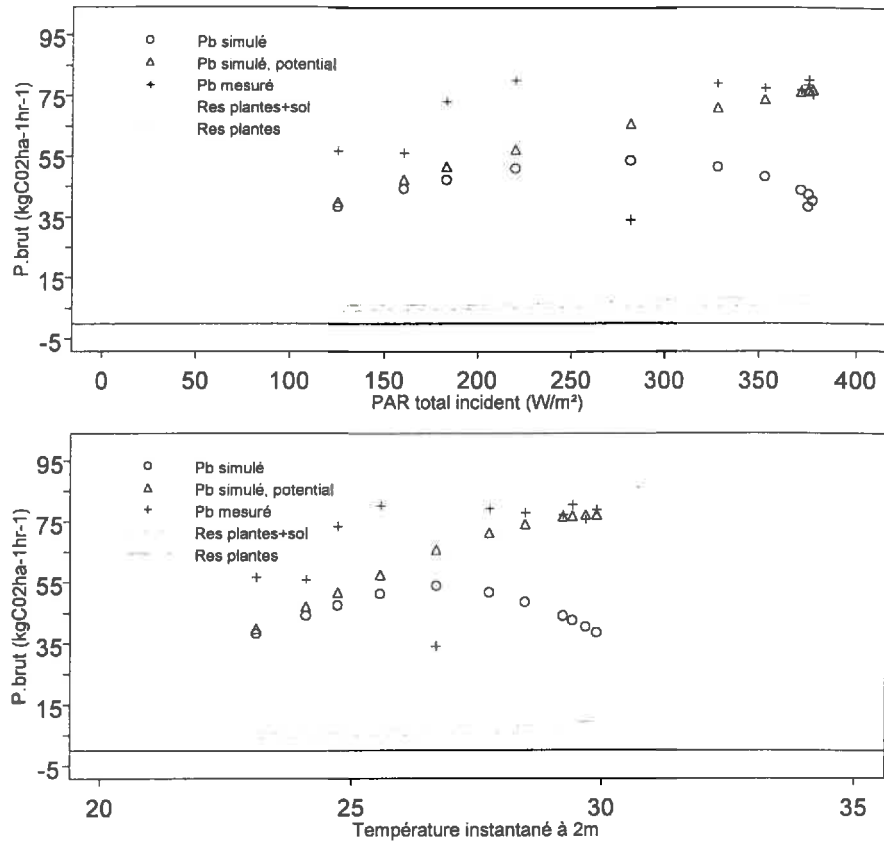
où la Δ masse représente la différence de masses entre deux prélèvements consécutifs. La masse de la partie aérienne est la somme des masses (vertes et sénescents) des feuilles, des pétioles, et du collet. La masse totale est la somme des masses de tous les organes (feuilles, pétioles, collet, pivot, racines fibreuses).

La masse totale de la plante est donc nécessaire pour calculer la répartition vers les parties aériennes et souterraines. Or, les organes sénescents et les racines fibreuses n'ont pas été mesurés. Nous les avons estimés en utilisant les fonctions de SUCROS. pour estimer le rapport de la masse de l'organe estimé à celle de l'organe vert mesuré.

Les fonctions de répartition estimées sont présentées avec les fonctions de répartition par défaut de SUCROS (Figure 4-18). On observe une certaine variabilité des taux de répartition estimés. Cette variabilité est due en premier lieu au mode de calcul discret qui augmente l'effet des erreurs commises sur les prélèvements. Par ailleurs, les fluctuations de la croissance nette due aux périodes de stress hydrique a amplifié les écarts d'un prélèvement à l'autre. Cependant, pour chaque fonction de répartition les tendances observées sur les taux mesurés correspondent généralement assez bien aux fonctions de répartition données par défaut dans SUCROS. Ainsi, les fonctions de répartitions entre organes aériens de SUCROS ont été conservées à cause du bon accord, constaté avec les mesures, pendant la croissance précoce. Cependant la fonction de répartition vers les parties aériennes a été modifiée pour tenir compte du comportement mesuré dans nos conditions, et qui indiquait une priorité d'allocation des assimilats vers les organes souterrains plus précoce que dans le standard de SUCROS. Cela pourrait être le signe de l'amélioration variétale qui a visé à limiter plus rapidement la croissance des feuilles au profit du pivot. La forme de la fonction retenue est présentée dans la Figure 4-19.

En utilisant les estimations des paramètres telles qu'elles ont été réalisées plus haut, et les valeurs par défaut des paramètres du module concernant la photosynthèse, on peut évaluer cet étalonnage partiel du modèle. Il apparaît que la simulation de la croissance de la biomasse totale est dans ces conditions sur estimée au début du cycle jusqu'à 100°C.j et sous estimée au delà. Compte tenu de la qualité satisfaisante des étalonnages effectués jusqu'alors, les différences qui restent seraient dues essentiellement à l'étalonnage du module photosynthèse/respiration. Comme nous n'avons aucune mesure de respiration, nous nous sommes attachés à l'étalonnage du module photosynthèse brute.

Jour 175



Jour 216

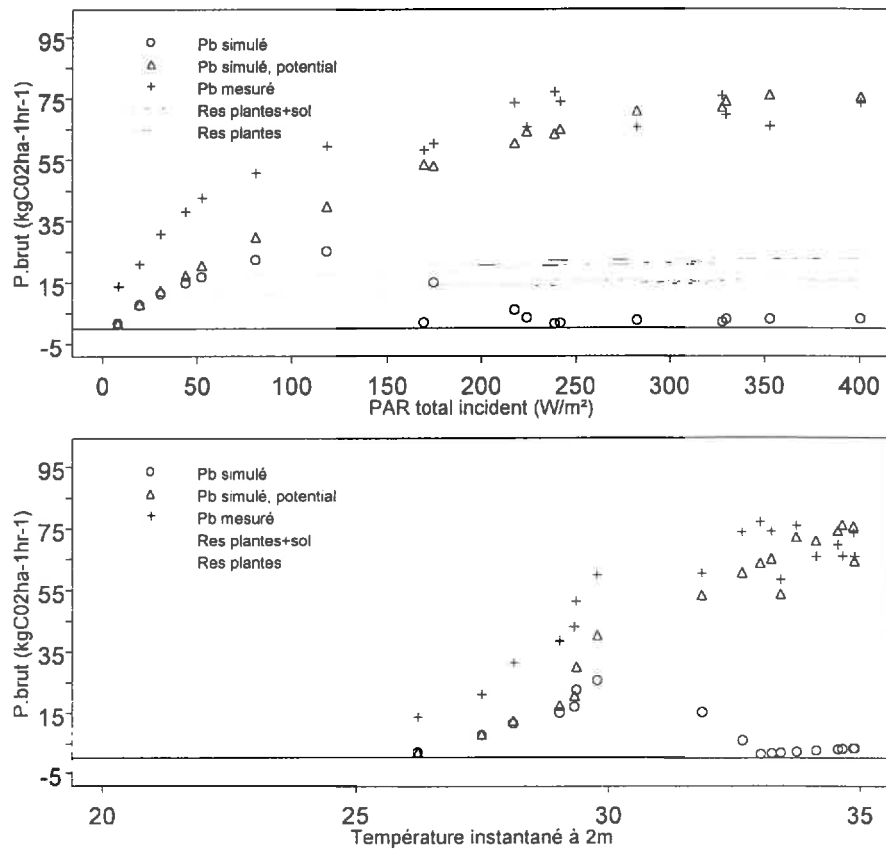


Figure 4-20. Photosynthèse brute mesurée et simulée en fonction du PAR incident et de la température instantanée à 2m. Jours 175 et 216.

Photosynthèse brute (Pb): Le module de simulation de la photosynthèse joue un rôle central dans le modèle. Les données d'entrée de ce module sont l'APAR, le LAI, la température, et le stade de développement. La variable de sortie est une quantité de moles de CO₂ assimilées et disponible pour la production de matière sèche. L'étalonnage de ce module Pb est difficile car il faut estimer non seulement les paramètres *EFF* et *AMX*, mais également les facteurs de réduction de *AMX* (cf. Figure 4-5). Le formalisme utilisé pour modéliser la Photosynthèse brute rend difficile le découplage des effets qui contrôlent la détermination de la valeur de *AMAX* journalière. Les quatre jours où nous avons effectués des mesures sont insuffisants pour un étalonnage satisfaisant de ce module. Les mesures n'ont pas été faites systématiquement pour tous les stades de développement et pour toute la gamme des températures diurnes.

Cependant, certaines informations peuvent être tirées de ces mesures de photosynthèse. La Figure 4-20 présente les photosynthèses brutes mesurées et simulées pour les jours 175 et 216.

Pour le jour 175, les plantes sont à un stade où le vieillissement n'a pas encore d'incidence sur la photosynthèse maxi (*AMAX*), seule la température affectera la photosynthèse instantanée et dans la simulation le facteur de réduction relatif à ce facteur sera actif sur *AMAX*. Pour le jour 216 le vieillissement des feuilles commence à avoir une incidence sur leur fonctionnement et les deux facteurs de réduction seront actifs dans la simulation.

La Pb est simulée avec et sans les facteurs de réduction sur *AMX* (sans facteurs de réduction, *AMAX* est égale à *AMX*). La température instantanée à 2m sous abri a été utilisée à la place de la température diurne dans la simulation de Pb.

- Pour les deux jours retenus en exemple, on observe que les valeurs mesurées de Pb du couvert plafonnent aux environs de 75 kg(CO₂)-ha⁻¹.hr⁻¹ à partir d'une valeur seuil du PAR de 200 à 250W.m⁻².
- Avant ce plafonnement, qui est probablement lié aux fortes températures, on constate que les valeurs simulées de la Pb potentielle (c'est à dire sans facteurs de réduction) sont inférieures aux valeurs instantanées mesurées de Pb. Le modèle sous-estime donc la Pb potentielle. Ceci suggère que les valeurs de *AMAX* et/ou de *EFF* sont trop faibles.
- En appliquant ces facteurs de réduction prenant en compte l'âge de la culture, qui sont pour les jours 175 (660°C.j) et 216 (1447°C.j) respectivement 1.0 et 0.85 (soit non réduction et 85% de réduction respectivement) et la température, la Pb a *fortiori* largement inférieure aux mesures. Il faut noter que l'effet température est surestimé puisqu'il est calculé avec la température instantanée sous abri (alors que dans le modèle, elle est prise en compte au niveau journalier, avec une température diurne).
- Quand on porte la Pb mesurée en fonction de la température instantanée, on constate qu'elle ne commence à plafonner que vers 27°C le jour 175 et vers 30°C le jour 216, pour ensuite décroître vers 34°C le jour 216. Il semble donc bien que dans ces conditions de mesures, la culture ait subi un stress thermique. Bien qu'on ne puisse directement comparer l'effet thermique instantané et

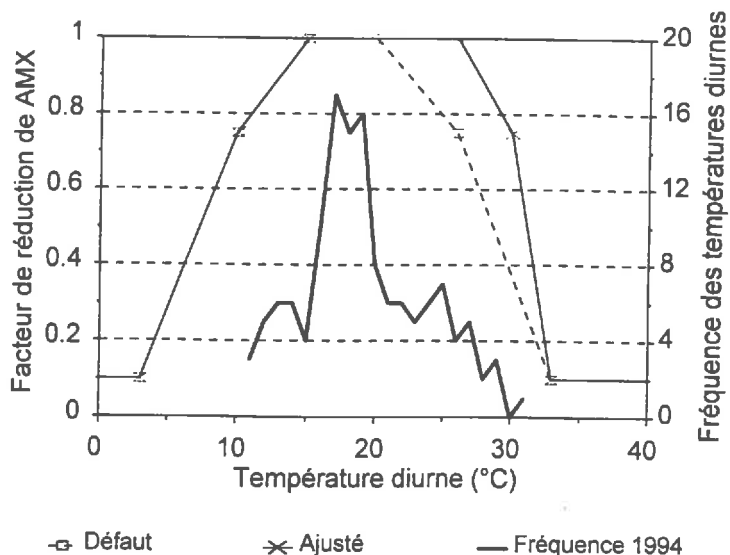


Figure 4-21. Ajustement du facteur de réduction du AMAX par la température et fréquence d'occurrence des températures diurnes pendant la saison.

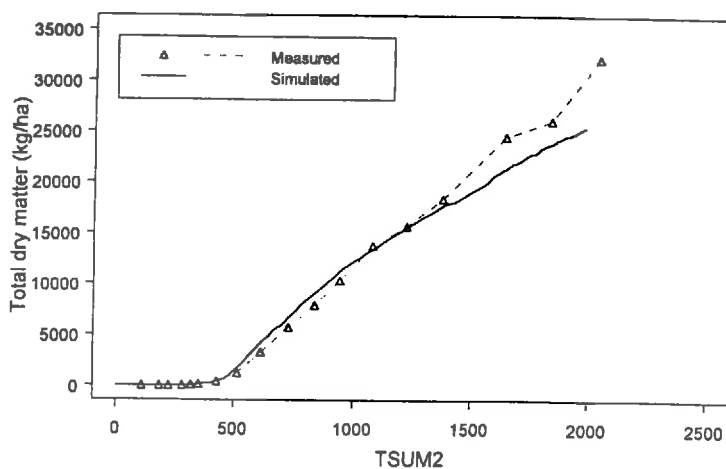


Figure 4-22. Evaluation de l'étalonnage partiel de SUCROS (biomasse totale) avant l'étalonnage des paramètres AMX et EFF.

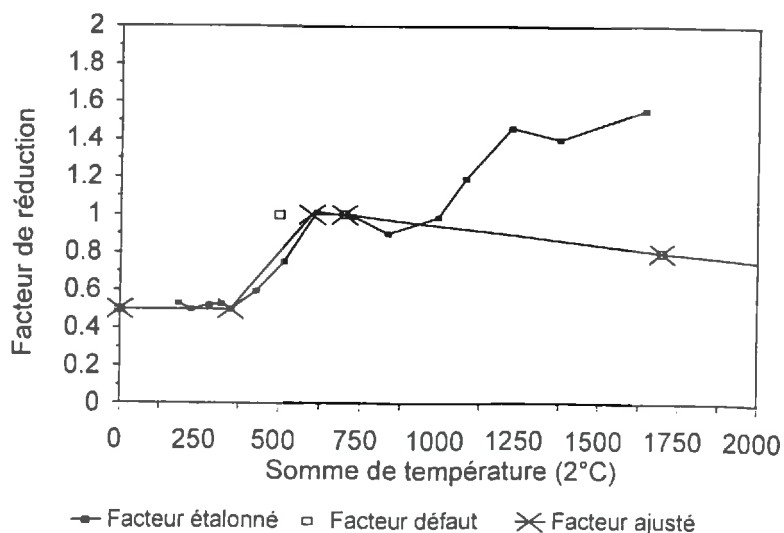


Figure 4-23. Modification du facteur de réduction de AMX à partir des mesures de biomasse totale. Les valeurs ont été normalisées par rapport à $60.0 \text{ kg}(\text{CO}_2)\cdot\text{ha}^{-1}(\text{feuille})\cdot\text{h}^{-1}$.

l'effet thermique diurne (tel qu'il est modélisé dans SUCROS), il semble que la borne de 20°C à partir de laquelle la réduction de *AMAX* intervient, est un peu faible. Une analyse des températures diurnes de la saison 1994 montre que presque tous les jours entre 750°C·j à 1500°C·j étaient supérieures à 20°C, en réduisant la capacité de Pb considérablement dans les simulations (Figure 4-20). Il est possible que les variétés de betteraves cultivées dans la région soient moins sensibles au stress thermique que celles cultivées aux Pays Bas (où SUCROS a été développé et originalement étalonné). Versteeg et van Keulen (1986) montrent que certains cultivars sont plus ou moins adaptés aux contraintes thermiques, et qu'ils possèdent une température optimale pour la photosynthèse qui est décalée selon leur adaptation au climat.

- Ainsi, étant donné l'effet de la température observé, le nombre de jours présentant des températures diurnes élevées, et la possibilité que les variétés cultivées dans le Nord de la France soient mieux adaptées à un climat plus chaud en moyenne, la limite maximale du facteur de réduction relatif à l'effet de la température a été augmentée de 20°C à 26°C. Cette modification est présentée à la Figure 4-21. Cette modification aura pour effet d'augmenter la photosynthèse pour les jours où la température diurne est supérieure à 20°C.

On constate que l'étalonnage du SUCROS, tel qu'elle, sur estime la croissance précoce, et sous estime la croissance mature (Figure 4-22). A défaut d'un étalonnage spécifique du module Pb à partir des données mesurées, on a donc pratiqué un étalonnage global à partir du modèle SUCROS complet (intégrant toutes les modifications précédentes), en minimisant la différence entre la biomasse totale mesurée et la biomasse simulée. Une estimation dynamique de *AMAX* a été conduite par ajustements successifs de la biomasse totale simulée à une série de 3 mesures consécutives. Après qu'une valeur de *AMAX* ait été calculée, la première des 3 mesures était abandonnée, un nouveau triplet était constitué des deux mesures conservées et de la mesure suivante. Les variables d'états de SUCROS étaient initialisées avec les valeurs correspondant à la date précédente. De cette façon, *AMAX* a été estimé de façon dynamique sur les 18 dates de prélèvements. Après une augmentation continue en fonction de la somme de température, le paramètre a atteint à partir de 600°C·j une valeur plateau d'environ 60 kg(CO₂)·ha⁻¹(feuille)·h⁻¹. Cette valeur a été retenue comme référence parce que le facteur de réduction proposé par défaut dans SUCROS atteint 1 à partir de 500-600°C·j, elle est de plus proche des résultats présentés par Hôdanova (1981). En normalisant les valeurs estimées de *AMX* par rapport à 60 kg(CO₂) ha⁻¹(feuille) h⁻¹ on peut déterminer les valeurs du facteur de réduction à retenir (Figure 4-23).

Jusqu'à 1000°C·j les valeurs par défaut du facteur de réduction proposées dans SUCROS amenaient à surestimer *AMAX*. Jusqu'à 600°C·j le facteur de réduction de développement a été ajusté à la courbe normalisée mais au delà de 700°C·j, on a conservé la courbe proposée dans SUCROS. Au delà de 1000°C·j, ces valeurs par défaut du facteur de réduction produisent une sous-estimation de la production de matière sèche, conduisant à des estimations de *AMX* très élevées et hors des limites biologiquement acceptables (Figure 4-24). Cela indique que, pour cette phase du cycle de la culture, où le couvert est très développé, le modèle n'est pas très sensible à *AMAX*. Par contre, compte tenu qu'une partie relativement importante du couvert fonctionne à éclairage non saturant, le modèle devient plus sensible au paramètre *EFF*.

En utilisant la même méthode que pour *AMX*, *EFF* a été estimé de façon dynamique (Figure 4-24) en utilisant jusqu'à 700°C·j les valeurs de *AMX*, corrigées avec le nouveau facteur de réduction.

Jusqu'à 1000°C·j, *EFF* reste à peu près stable autour de $0.55 \text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{ha}^{-1}(\text{feuille}) \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, au delà il augmente brutalement à 0.65, pour prendre en compte l'augmentation de production de biomasse observée. Une hypothèse qui peut être avancée, bien que non vérifiée, est que les forts niveaux de développement foliaire atteints vers 1000°C·j ($\text{LAI} > 4$, voir Chapitre 3 Figure 3-7) provoquent à la fois des flux élevés de respiration et une forte limitation de la convection au sein du couvert résultant dans une augmentation de la concentration du CO_2 dans le couvert. Cette augmentation provoquerait une augmentation de l'efficacité de la photosynthèse. Chartier *et al.* (1977) illustrent l'effet d'une augmentation de la teneur en CO_2 sur la photosynthèse nette de la feuille de betterave: une augmentation de 300 à 400 ppm de la teneur en CO_2 de l'air conduit à une augmentation de 50% de la photosynthèse nette de la feuille.

Si ces modifications apportées aux valeurs des paramètres de *Pb* vont bien dans le sens des observations faites sur les mesures de photosynthèse nette et permettent de faire produire plus de biomasse aux plantes, il nous faut signaler qu'elles ne constituent pas la seule possibilité de correction. En effet, des résultats équivalents pourraient être obtenus en jouant sur les niveaux de respiration: on pourrait par exemple réduire, davantage qu'il n'est proposé dans le modèle, les taux de respiration de maintenance lorsque la culture est plus âgée. En effet, au moment où la culture est très développée ($\text{LAI}=4$) mais encore complètement verte, cette respiration de maintenance représente environ 15 à 20% des assimilats produits et la fonction multiplicative de réduction de cette respiration en fonction de l'âge ($R_{\text{maint_age}} = F_{\text{age}} \times R_{\text{maint}}$) varie de 1 à 0.6 en fin de culture. Une augmentation de l'effet de cette fonction de réduction, diminuerait la respiration de maintenance et conduirait à une augmentation de la photosynthèse nette (*Pn*). Les estimations de *Pb* faites à partir de nos mesures de *Pb* en ajoutant la respiration seraient d'ailleurs alors diminuées.

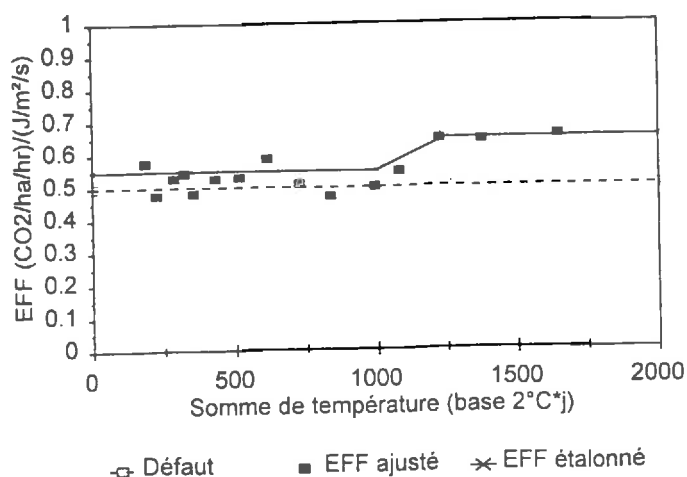


Figure 4-24. Modification de l'efficacité initiale *EFF*. Les valeurs ajustées sont calculées par inversion dynamique de *SUCROS* sur les mesures de biomasse totale.

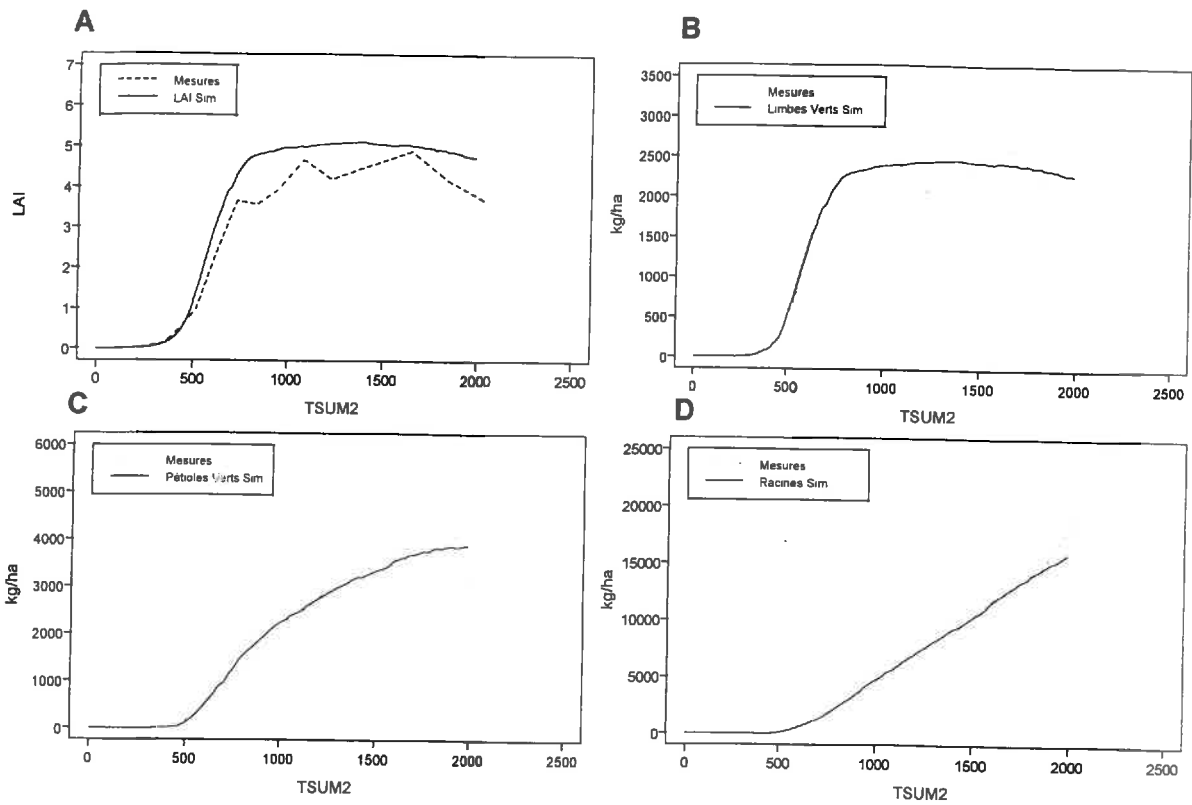


Figure 4-25. Résultats de l'étalonnage complet de SUCROS: comparaison des valeurs simulées et mesurées pour A) le LAI, et la biomasse des B) feuilles verts, C) pétioles verts, et D) pivots. La ligne continue correspond à la simulation, la ligne pointillée aux mesures. La croissance est représentée en fonction de la somme de température (base 2°C) après levée, Tsum2.

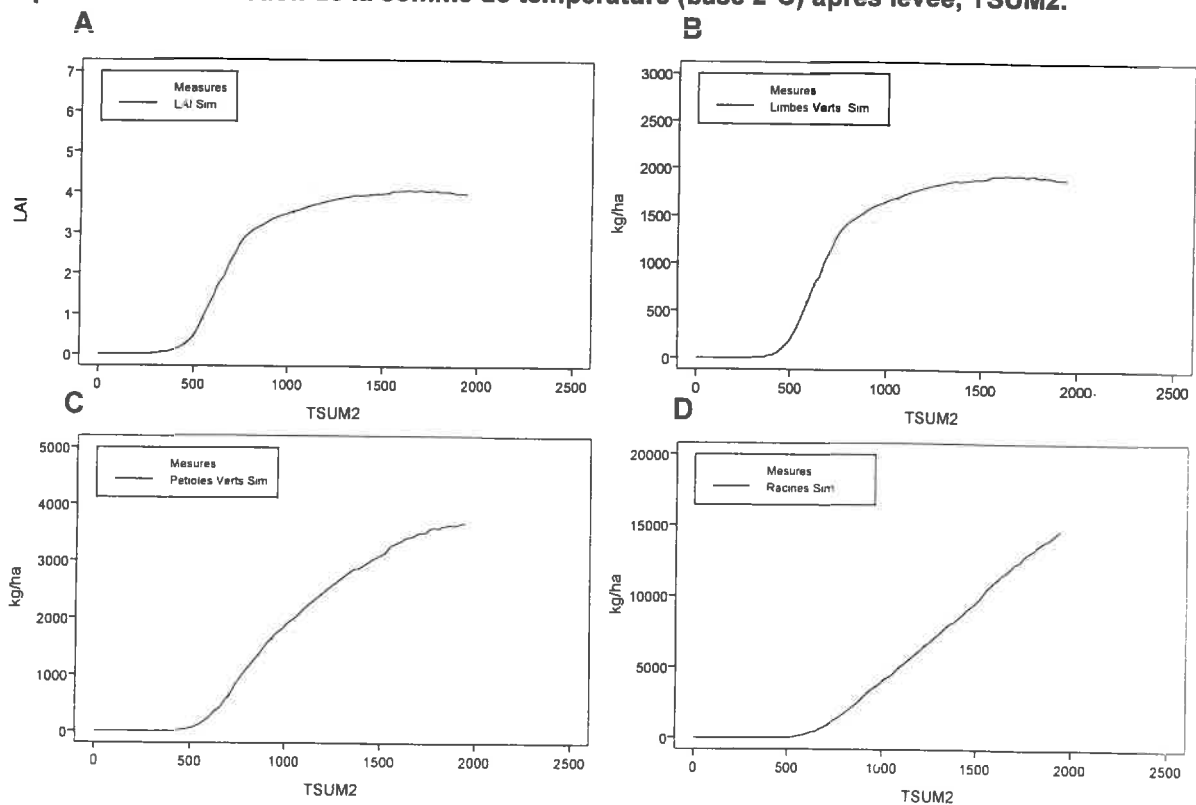


Figure 4-26. Evaluation de l'étalonnage complet de SUCROS sur la parcelle test: A) LAI, B) masse des feuilles verts, C) masse des pétioles verts, D) masse des pivots. Voir Figure 4-25.

4.1.3.3 Résultats de l'étalonnage de SUCROS

On a rassemblé dans le Tableau 4-2 les coefficients qui ont été modifiés lors de l'étalonnage de SUCROS dans nos conditions.

Tableau 4-2 Coefficients modifiés par l'étalonnage de SUCROS sur l'expérimentation Mons94.

Paramètre	Signification	Valeur par défaut		Nouvelle valeur	
<i>Interception</i>					
<i>CLUSTF</i>	facteur d'agrégation des feuilles	0.964		$CLUSTF = a + b \cdot \ln(LAI)$ $a=0.9917, b=0.1743$	
<i>Répartition</i>					
<i>FSHTB</i>	fonction de répartition vers les organes aériens: valeurs en fonction de TSUM2 ¹	<u>TSUM2</u> 0., 400., 900., 901., 3000.	<u>FSHTB</u> 0.800, 0.700, 0.520, 0.220, 0.220	<u>TSUM2</u> 0., 400., 725., 800., 3000.,	<u>FSHTB</u> 0.800, 0.700, 0.450, 0.30, 0.30
<i>Photosynthèse</i>					
<i>AMX</i>	taux de photosynthèse maxi.	50.		60.	
<i>AMDVST</i>	facteur de réduction de la photosynthèse maxi lié à l'âge valeurs en fonction de TSUM2	<u>TSUM2</u> 0, 500., 700., 1700., 3000.	<u>AMDVST</u> 0.5, 1.0, 1.0, 0.8, 0.6	<u>TSUM2</u> 0, 350., 600., 700., 3000.	<u>AMDVST</u> 0.5, 0.5, 1.0, 1.0, 0.6
<i>AMTMPT</i>	facteur de réduction de la photosynthèse maxi lié à la température. valeurs en fonction de TSUM2	<u>Temp.Diurne</u> -10., 3.0, 10., 15., 20, 26., 33., 45.	<u>AMTMPT</u> 0.1, 0.1, 0.75, 1.0, 1.0, 0.75, 0.1, 0.1	<u>Temp.Diurne</u> -10., 3.0, 10., 15., 20., 26., 33., 45.	<u>AMTMPT</u> 0.1, 0.1, 0.75, 1.0, 1.0, 0.75, 0.1, 0.1
<i>EFF</i>	efficacité initiale d'utilisation de la lumière. valeurs en fonction de TSUM2	0.5		<u>TSUM2</u> 0., 1000., 1250., 2000.	<u>EFF</u> 0.55, 0.55, 0.65, 0.65
note: 1 TSUM2=somme des températures (base 2°C) depuis la levée					

Une première évaluation de l'étalonnage du modèle consiste à comparer les courbes de croissance en masse et en surface de la culture. La Figure 4-25 montre la simulation du LAI, des masses de feuilles et de pétioles verts, et des racines. On constate que les courbes de croissance sont bien restituées. Le LAI est cependant quelque peu surestimé; pour en améliorer la simulation nous aurions pu ajuster le paramètre SLA, mais les mesures de SLA ne justifiaient pas qu'on en change la valeur. Par ailleurs, la différence entre le LAI mesuré et simulé est faible et en fait influe peu sur la croissance globale quand le LAI dépasse 2.5-3.5, c'est à dire quand l'interception du PAR est quasiment totale.

Ensuite le modèle a été évalué sur la parcelle test pour laquelle on a fourni les paramètres d'initialisation et d'implantation. Les mêmes variables d'état que pour la figure précédente sont présentées dans la Figure 4-26. La croissance des organes et de la biomasse totale est cette fois ci encore bien simulée. Ce test montre la capacité de SUCROS à rendre compte dans le Nord de la France de la croissance de la betterave lorsque les paramètres d'initialisation et d'implantation sont connus, en conditions optimales de croissance.

4.2 Le modèle SAIL

4.2.1 Description du fonctionnement et des paramètres de SAIL

Les quatre équations analytiques du modèle SAIL qui décrivent les flux dans une couche homogène (ici la canopée) ont été présentés préalablement dans le Chapitre 2. Nous présenterons ici les aspects du modèle qui concernent son fonctionnement et ses paramètres.

La structure de la canopée est décrite par deux paramètres, le LAI, et un angle foliaire moyen (*ALA*). La fonction discrète de distribution des angles foliaires (*LIDF*) (proportion de LAI dans 13 classes d'inclinaison des feuilles θ_L) est considérée ici comme ellipsoïde. θ_L est l'angle de la normale à la feuille avec la verticale. L'orientation azimutale des feuilles est aléatoire

L'angle foliaire moyen (*ALA*) est l'intégrale discrète sur les *i* classes d'inclinaison des feuilles telle que:

$$ALA = \sum_{i=1}^{13} \theta_{L_i} \cdot LIDF_i$$

Eq. 4-5

Le flux incident au dessus la canopée est composé d'une partie directe et d'une partie diffuse, dont le rapport est défini par le paramètre skyl (diffus/total). Les neuf coefficients du modèle SAIL (*k*, *K*, *s*, *s'*, *a*, σ , *u*, *v*, et *w*) des équations Eq. 2-9 à 2-12 sont calculés à partir des propriétés optiques des feuilles, du LAI et de l'angle foliaire pour les flux diffus et incident. Les coefficients sont déterminés pour les 13 classes d'angles. Les coefficients *K*, *u*, *v*, et *w* sont très sensibles aux variations de l'angle foliaire au voisinage du nadir. Les premières classes (1 à 8) sont centrées sur des intervalles de 10° (i.e. 0-10°, 10-20°..., 70-80°). Les 5 dernières classes sont centrées sur des intervalles de 2° (i.e. 80-82°..., 88-90°) pour avoir une description plus fine des angles proches du nadir. La méthode de détermination des neuf coefficients pour chacun des flux est décrite par Verhoef (1984, 1985), Baret et Podaire (1988), et par Goel (1988); elle ne sera pas présentée ici.

À partir de la fonction de répartition *LIDF*, les surfaces des feuilles relatives à chacun des flux donnés par les quatre équations doivent être pondérées par la probabilité qu'une fraction soit éclairée et/ou observée. Ces surfaces apparentes sont exprimées pour chacun des flux en fonction de la géométrie d'éclairement (θ_s , φ_s), de la géométrie d'observation (θ_o , φ_o) et de l'inclinaison de la feuille (θ_L , φ_L). Le phénomène du "hot spot" apparaît quand les angles d'éclairement et d'observation ont tendance à se confondre. Plus ces angles sont semblables, plus la probabilité qu'une fraction des feuilles soit à la fois éclairée et observée augmente.

La réflectance du couvert peut-être ensuite déterminée. On suppose que le couvert est une monocouche. La réflectance du couvert (ρ_C , bidirectionnelle) s'exprime par:

$$\rho_C = \rho_S + \rho_D + \rho_{SKL}$$

Eq. 4-6

où

ρ_S = contribution du flux direct incident (flux solaire, la réflexion directe) à la réflectance du couvert;

ρ_D = contribution du flux diffus à la réflectance du couvert; et

ρ_{SOL} = contribution de la composante directe du flux diffusé par le sol à la réflectance du couvert. Le flux diffusé par le sol, puis par les feuilles, interviennent dans ρ_D .

Les paramètres de SAIL:

Ils sont présentés dans la Tableau 4-3.

Tableau 4-3. Paramètres d'entrée de SAIL.

Paramètres	Description
<i>Structure de la canopée et propriétés optiques des feuilles:</i>	
LAI	Surface foliaire
ALA	Angle moyen foliaire
hot spot	Paramètre de hot spot
$\rho_F(\lambda)$	Réflectance spectrale d'une feuille
$\tau_F(\lambda)$	Transmittance spectrale d'une feuille
<i>Propriétés optiques du sol:</i>	
$\rho_{\text{SBID}}(\lambda)$	Réflectance spectrale bidirectionnelle du sol
$\rho_{\text{SHD}}(\lambda)$	Réflectance spectrale hémisphérique directionnelle du sol
$\rho_{\text{SBiH}}(\lambda)$	Réflectance spectrale bihémisphérique du sol
<i>Géométrie d'illumination et de visée:</i>	
θ_D	Angle zénithal d'observation (0° pour nadir)
θ_S	Angle zénithal d'illumination direct
φ	Angle azimutal entre source d'illumination et direction d'observation (0° pour nadir)
skyl	Fraction diffuse du rayonnement incident total

- Structure de la canopée et propriétés optiques des feuilles:

Deux groupes des paramètres sont utilisés pour définir les caractéristiques du couvert.

On distingue d'abord les paramètres de la structure. Le LAI est le paramètre principal qui définit la quantité de surface de feuilles qui va avoir une interaction avec les différents flux incidents et descendants. Le deuxième paramètre est ALA, l'angle foliaire moyen. Ce paramètre est souvent estimé par inversion du modèle à partir des mesures. Le troisième est le *hot spot*, défini par Kuusk (1993) qui a été ajouté dans le modèle après qu'il ait été publié (Baret, pers. com.). Le *hot spot* est souvent considéré comme constant pour une culture donnée; il suppose que la surface moyenne des feuilles est proportionnelle à la hauteur du couvert de la culture. Plus le *hot spot* est élevé plus la réflectance augmente pour les angles où le phénomène a un sens et où les propriétés non lambertiennes de la culture s'accroissent (Clevers et Verhoef, 1993). Les autres paramètres de la culture sont variables dans le temps et dans l'espace et doivent être déterminés pour chaque utilisation de SAIL.

Les paramètres du second groupe concernent les propriétés optiques des feuilles: la réflectance (ρ_F) et la transmittance (τ_F) d'une feuille. Ces paramètres spectraux dépendent de l'état de la feuille (l'âge, la teneur en chlorophylle... , cf. Chapitre 2).

- Propriétés optiques du sol:

La réflectance du sol est spectrale comme les propriétés optiques des feuilles. Des paramètres indépendants peuvent être donnés pour la réflectance bidirectionnelle, à partir de la réflectance hémisphérique directionnelle, ou de la réflectance bihémisphérique si elle est connue, sinon, la réflectance est considérée comme lambertienne. La réflectance du sol dépend surtout de son

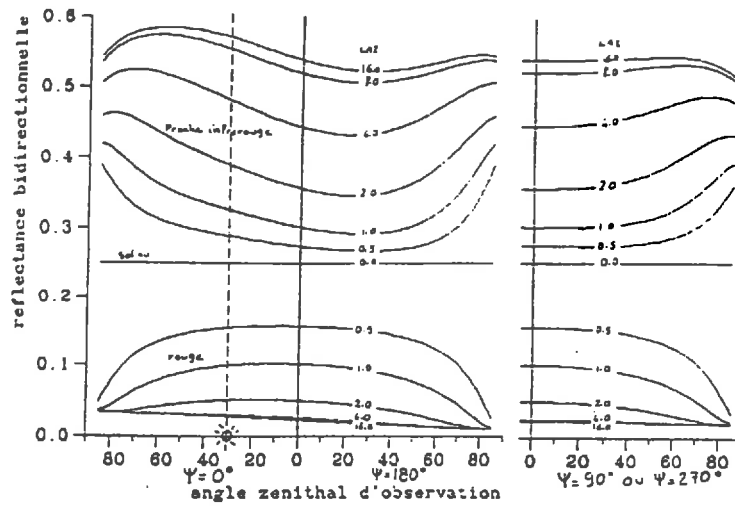


Figure 4-27. Réflectance bidirectionnelle (rouge et proche infrarouge) simulée par SAIL en fonction de l'angle zénithal (θ_o) d'observation, dans le plan principal ($\varphi_o=0^\circ$, $\varphi_o=180^\circ$) et dans le plan perpendiculaire ($\varphi_o=90^\circ$, $\varphi_o=270^\circ$) pour différents LAI (Baret et Podaire, 1988).

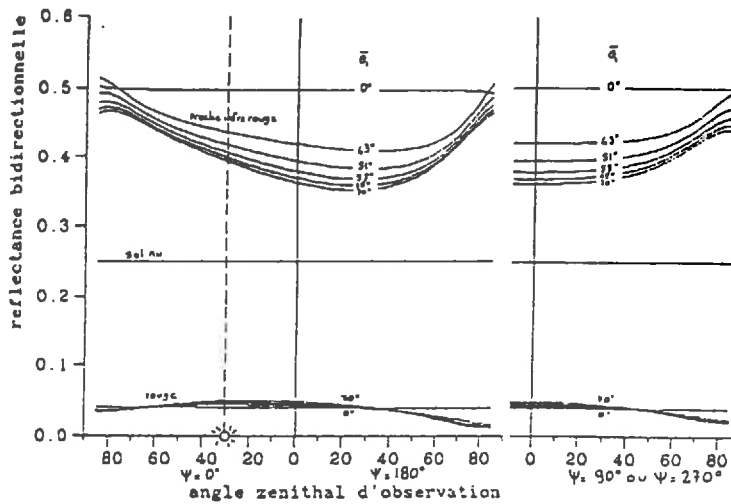


Figure 4-28. Idem Figure 4-27 mais LAI=2.0 et on fait varier l'angle moyen θ_L de la fonction de distribution des inclinaison foliaires (θ_L varie de 0° à 70°) (Baret et Podaire, 1988).

humidité, de sa rugosité, et de la teneur en matière organique. Évidemment, ces caractéristiques sont variables dans le temps et dans l'espace.

- Géométrie d'illumination et de visée:

Les paramètres définissent les angles zénithal (θ_s) du soleil et de la visée (θ_v) et la différence entre les angles azimutaux du soleil (Ψ_s) et de la visée (Ψ_v). Ces paramètres sont déterminés à partir de l'heure d'acquisition des mesures et des équations astronomiques. La fraction du rayonnement diffus, skyl, est aussi nécessaire; elle peut-être soit mesurée, soit estimée à partir des mesures d'éclairement.

Quand SAIL est appliqué à l'échelle locale (i.e. à l'échelle d'une parcelle), tous les paramètres peuvent être mesurés soit directement soit par inversion du modèle à partir des mesures de réflectance. Ce n'est pas le cas quand SAIL est appliqué à une échelle plus grande où les paramètres du couvert et du sol ne sont pas connus.

4.2.2 Analyse de sensibilité de SAIL

On s'est fondé sur les résultats de la bibliographie car plusieurs auteurs ont pratiqué une telle étude. Baret et Podaire (1988) ont examiné la sensibilité de SAIL aux paramètres du couvert et à la géométrie des mesures. En utilisant une version du modèle qui prend en compte (semi-empiriquement) la fraction de sol couvert, Major *et al.* (1992) ont analysé la sensibilité au LAI, à l'angle foliaire moyen *ALA*, et à la réflectance des feuilles et du sol. Jacquemoud (1992), Clevers et Verhoef (1993), et Clevers et van Leeuwen (1994) ont couplé les modèles SAIL et PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990) et ils ont aussi pratiqué des analyses de sensibilité. Jacquemoud a analysé la sensibilité aux paramètres sur une large gamme du spectre. Clevers et van Leeuwen a utilisé les modèles pour examiner la précision des indices de végétation pour estimer la fraction du PAR absorbé dans le couvert. Verhoef (1984) a analysé la différence entre la réflectance du couvert simulée par SAIL et le modèle de Suits (1972). Chacune de ces études avaient des objectifs différents, mais leurs résultats sont utilisables dans ce travail.

Dans tous les cas, les analyses ont été faites en faisant varier un paramètre, les autres étant fixés à une valeur théorique ou moyenne. La sensibilité du modèle a été analysée en visualisant la réponse du modèle ou, dans le cas de Clevers *et al.* (1994), en visualisant l'erreur relative associée à l'estimation de la fraction du PAR absorbé.

Les paramètres ont tendance à avoir des effets différents sur la réflectance du couvert dans les bandes spectrales rouge-verte et du PIR parce que les flux sont fortement absorbés dans le PAR et sont fortement réfléchis et transmis dans le PIR: quand le LAI augmente, la réflectance du couvert s'éloigne de celle du sol en diminuant dans le PAR et en augmentant dans le PIR.

4.2.2.1 Sensibilité aux paramètres du couvert

LAI et θ_L : La réflectance est sensible au LAI et à θ_L parce que tous deux déterminent la quantité de surface du sol illuminée et visée. La Figure 4-27 montre que la réflectance dans le rouge diminue rapidement et sature autour de 4.0LAI. La réflectance dans le PIR augmente lentement avec les faibles LAI, et éventuellement sature pour des valeurs très élevées du LAI (8.0). La Figure 4-28 montre que la réflectance dans le PIR est relativement peu sensible dans les faibles valeurs de θ_L , et pour les angles supérieurs à 60°.

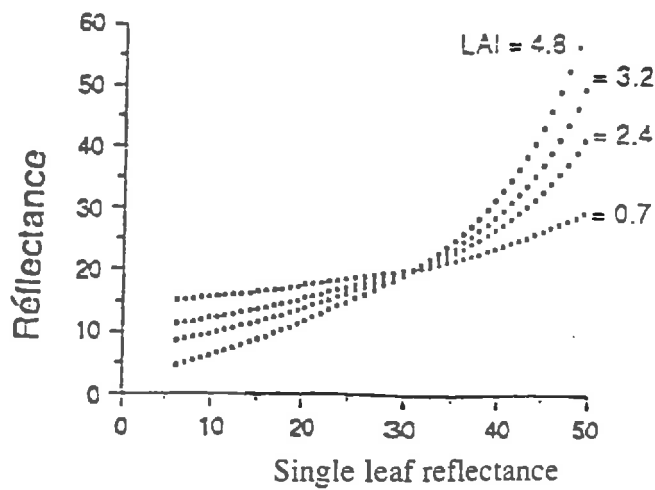


Figure 4-29. Réflectance bidirectionnelle du couvert en fonction de la réflectance d'une feuille simulée par SAIL pour les différents LAI (de 0.7 à 4.8) ($\theta_L = 42^\circ$, $\theta_s = 38^\circ$, $\psi_s = 160^\circ$, réflectance du sol = 0.2 rouge et 0.27 PIR) (d'après Major *et al.*, 1992).

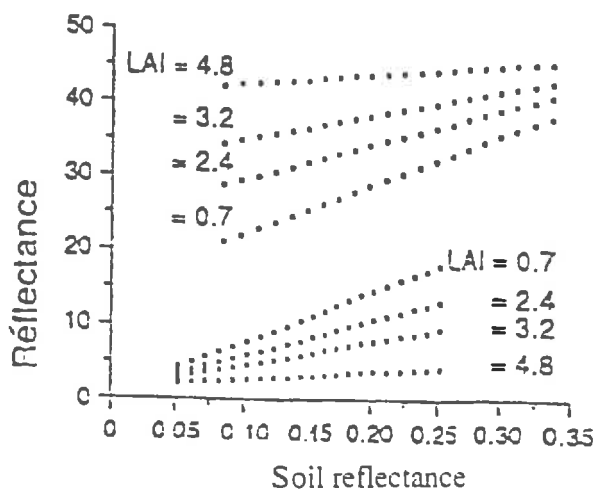


Figure 4-30. Réflectance bidirectionnelle (rouge, proche infrarouge) du couvert simulée par SAIL en fonction de la réflectance du sol pour les différents LAI (de 0.7 à 4.8). Voir Figure 4-29. (d'après Major *et al.*, 1992)

La réflectance dans le rouge est quasiment insensible à θ_L . Ces deux paramètres combinés seront les facteurs principaux de la variabilité de la réflectance dans le PIR quand le LAI est élevé (i.e. LAI>4.0).

hot spot: D'après Clevers and Verhoef (1993) et Clevers *et al.* (1994) la réflectance du couvert au paramètre *hot spot* est très peu sensible, en particulier au nadir.

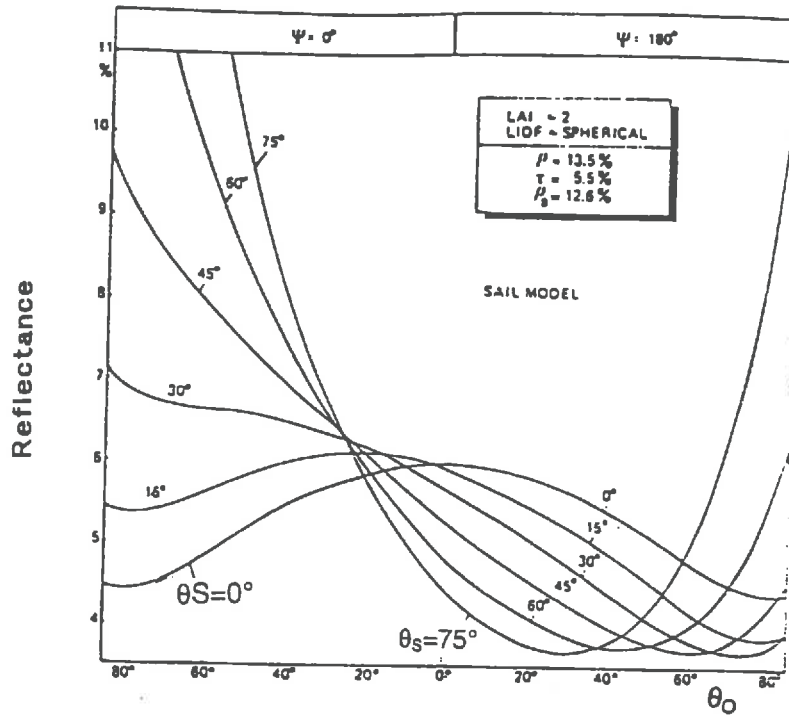
ρ_L and τ_L : La réflectance et la transmittance dans les bandes rouge et dans le PIR donnent des réponses très différentes selon les flux dans le couvert. La Figure 4-29 présente la variabilité de la réflectance du couvert elle varie pour ces longueurs d'onde entre 6 et 50% (dans cette analyse, quand ρ varie, τ est égale à $1.25\rho - 0.06$, $\rho_{sol} = 20\%$, $\theta_L=42^\circ$, et $\theta_S=38^\circ$). La sensibilité est testée pour des LAI égaux à 0.7, 2.4, 3.2, et 4.8. Dans le rouge, la réflectance des feuilles est de l'ordre de 5 à 10% et dans le PIR, elle est de 45 à 48%. Pour un faible LAI de 0.7, la réflectance du couvert dans le rouge varie très peu. Il en est de même pour la réflectance des feuilles dans le PIR, la pente de la courbe est seulement un peu moins faible. Par contre, quand le LAI est supérieur (ou égal) à 2.4, la sensibilité de la réflectance s'accroît dans le rouge, et particulièrement dans le PIR où la pente est presque de 2 (c'est-à-dire qu'un changement de 2% de la réflectance dans le PIR provoque un changement de 4% de réflectance de couvert). Carter (1994) a étudié l'effet de stress sur les propriétés optiques des aiguilles de la "loblolly pine" et a montré que la variabilité de la réflectance est plus importante dans les bandes vertes et la région du "red edge", mais que la réflectance dans le PIR reste assez stable. Jacquemoud (1991) a montré que l'effet de la teneur en chlorophylle a+b influe sur la réflectance du couvert entre 400-750nm. Si la teneur en chlorophylle varie en conditions de stress on peut penser, qu'en conditions optimales de croissance, les propriétés optiques dans le PAR ne devraient varier que très modérément au cours du cycle et encore moins dans le PIR. On peut donc considérer que dans la pratique le modèle SAIL n'est que très peu sensible aux propriétés optiques des feuilles.

4.2.2.2 Sensibilité à la réflectance du sol

ρ_{sol} : Pour les faibles valeurs de LAI la réflectance de la culture est dominée par la réflectance du sol. Comme le montrent (Figure 4-30) les résultats sur le maïs de Major *et al.* (1992), dans le rouge et le PIR, la réflectance du couvert augmente avec celle du sol.

Pour une grande gamme de LAI, au delà de 4.8, lorsque l'absorption des flux par le couvert est suffisamment importante, la réflectance du couvert dans le rouge n'est que très peu sensible aux faibles valeurs de ρ_{sol} . Par contre quand le LAI est faible la réflectance du couvert est plus sensible à la variabilité en ρ_{sol} . Quand le LAI vaut 4.8, les effets du ρ_{sol} sont fortement diminués. Cependant Major *et al.* utilisaient une version de SAIL qui prenait en compte semi-empiriquement l'hétérogénéité du couvert. Pour les LAI faibles, leurs résultats montraient une réflectance un peu plus sensible que notre version où le couvert est considéré comme homogène.

A



B

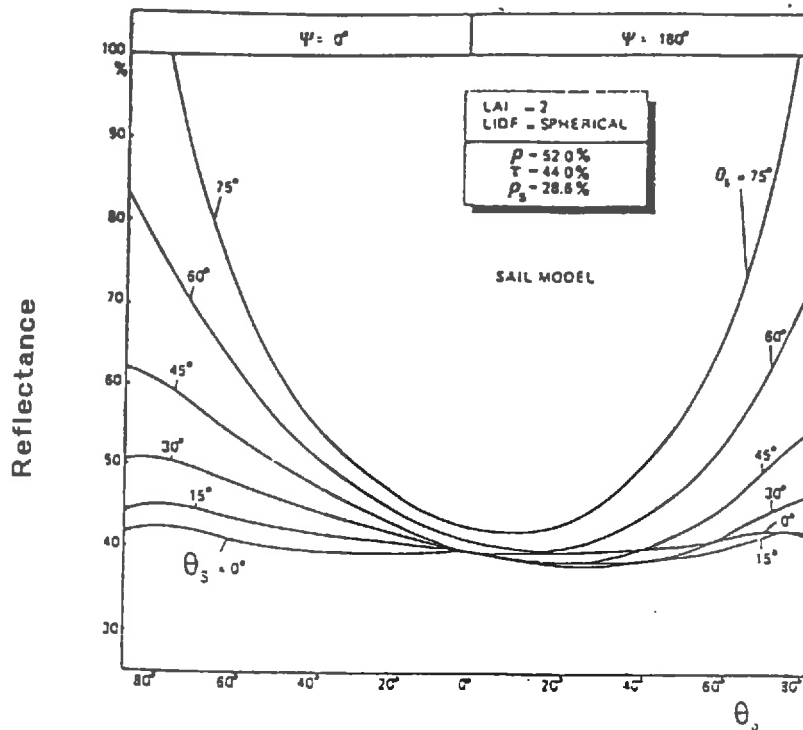


Figure 4-31. Réflectance bidirectionnelle du couvert A) vert et B) proche infrarouge simulée par SAIL en fonction de θ_0 pour différents angles zénithaux d'éclairage. (d'après Verhoef, 1984).

4.2.2.3 Sensibilité à la géométrie d'illumination et de visée

θ_s , ψ_s , θ_v : Les angles d'illumination et de visée ont une influence importante sur la réflectance du couvert, mais comme nous l'avons vu plus haut, cet effet dépend de la distribution des angles foliaires. L'analyse de sensibilité faite par Verhoef (1984) a montré que SAIL, une fois modifié le modèle de Suits dont la prise en compte de θ_s et θ_v n'était pas réaliste, décrit bien la réflectance du couvert en fonction de θ_s et θ_v . Nous montrons dans la Figure 4-31A,B la sensibilité de la réflectance à ces deux angles dans le vert et dans le PIR. L'abscisse varie l'angle de visée entre 80° à nadir à 80° (i.e. φ égal soit 0° , soit 180°). Les courbes sont la réflectance du couvert (y axis) en fonction des angles d'illumination, θ_s , de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , et 75° . Les paramètres correspondent à une culture de blé, avec un LAI de 2.0 et une distribution sphérique des angles. La réflectance est symétrique autour du nadir dans les deux longueurs d'ondes, mais quand θ_s augmente, la réflectance devient très dissymétrique dans le vert. La dissymétrie provient de ce qu'il y a moins d'ombrage quand les angles θ_s et θ_o se rapprochent, la réflectance est donc plus élevée. A l'opposé du nadir du soleil, il y a peu de feuilles à la fois éclairées directement et visées, et donc la réflectance diminue.

On voit que plus θ_s est élevé, plus la réflectance varie. Bien que les ordres des grandeurs soient plus faibles dans le vert, en différence relative, la réflectance varie autant que dans le PIR. Pour un θ_s de 30° , la différence est de 33% pour les angles extrêmes (20° et 70°). Dans le PIR, la différence est de 20% (70° et 30°). Dans la plus part des cas, θ_o est du nadir et θ_s est peu souvent supérieur à 60° , donc c'est clair que la variabilité est moindre dans le PIR mais elle reste importante pour la verte.

Malgré cette variabilité, les angles sont souvent bien déterminés parce que ils sont calculés facilement à partir de l'heure de mesure, quand elle est connue. Des sources de variabilité peuvent intervenir pour les données acquises par des scanners aéroportés où l'angle de vue s'éloigne du nadir.

4.2.3 Résultats de l'étalonnage de SAIL

Considérant que l'ensemble des autres paramètres étaient connus au moment des mesures, nous avons étalonné SAIL en estimant la valeur de l'angle foliaire moyen, *ala*.

Le LAI a été déterminé à partir des mesures de croissance effectuées à un ou deux jours près des mesures de réflectance du couvert, ou bien par interpolation linéaire entre deux dates de mesure encadrant les mesures de réflectance lorsque des mesures plus proches n'étaient pas disponibles. L'humidité du sol a été contrôlée par prélèvement dans les placettes où la réflectance du couvert était mesurée. La réflectance du sol a été estimée à partir d'une relation ρ_{sol} - humidité établie sur un sol de même texture et de rugosité semblable. On a fait l'hypothèse que le sol est lambertien. On a pris pour la réflectance et la transmittance des feuilles des valeurs moyennes obtenues la même année au cours d'une expérimentation similaire (Clermont-les-Fermes). La culture ayant servi à l'étalonnage de SAIL étant irriguée on a admis que les propriétés optiques des feuilles sont restées constantes pendant la saison. Les paramètres de ρ_F et τ_F , ainsi que ρ_{sol} sont reportés dans le Tableau 4-4.

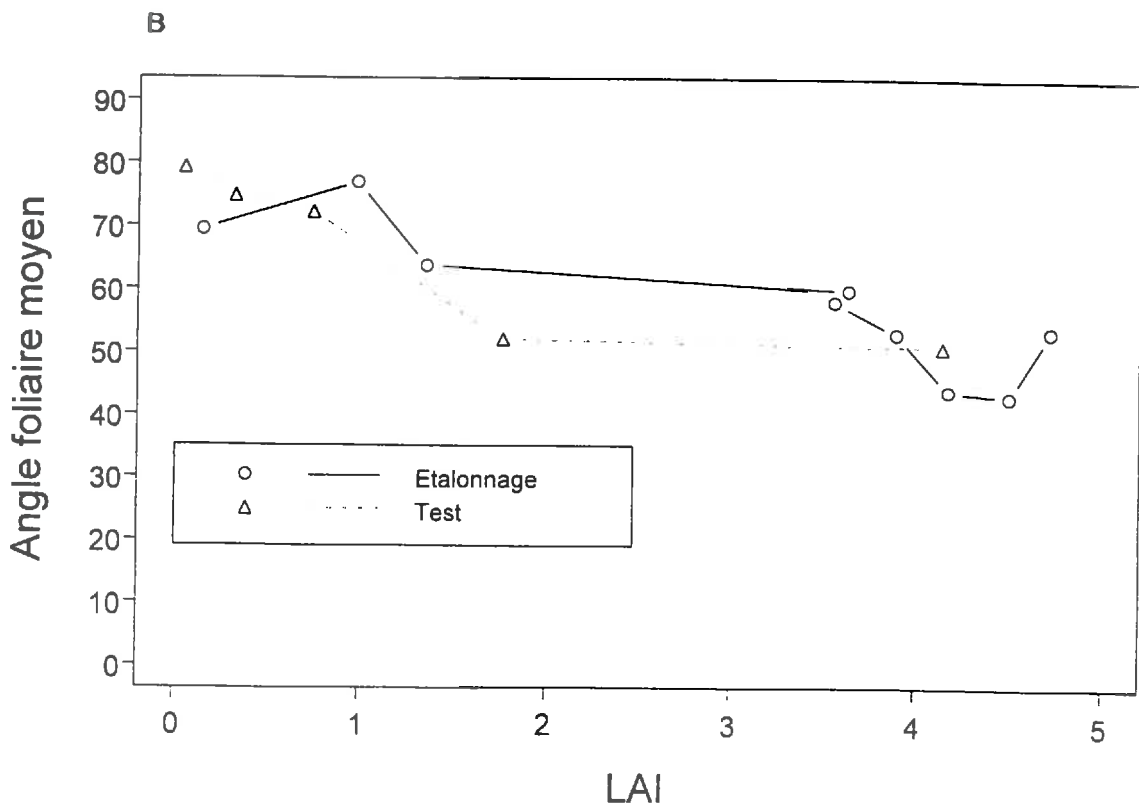
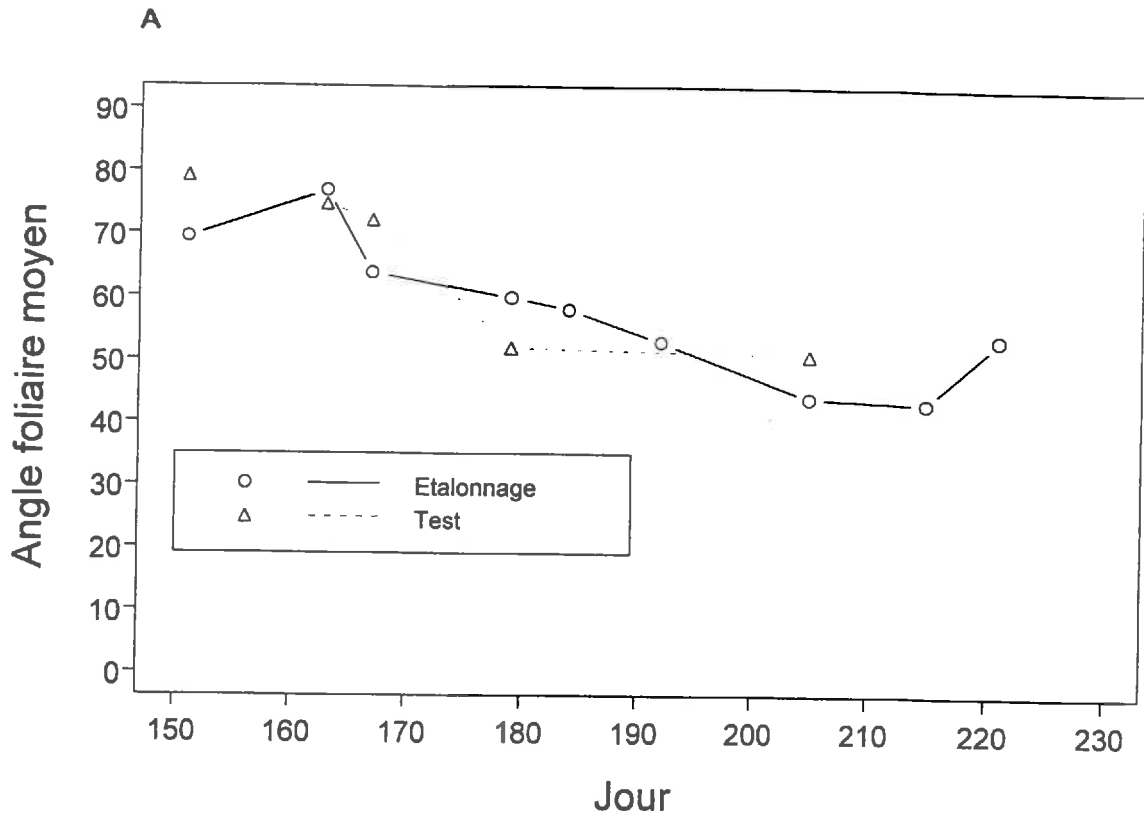


Figure 4-32. Etalonnage de SAIL: estimation de l'évolution du paramètre θ_L . A) en fonction du temps, et B) en fonction du LAI.

Les paramètres d'illumination et de visée ont été calculés pour chaque mesure à partir de l'heure solaire de la mesure. La réflectance a été mesurée au nadir. Le paramètre *skyl* a été déduit de moyennes de mesures du PAR diffus et du PAR total effectuées sur place toute les dix minutes.

Tableau 4-4. Paramètres de SAIL utilisés pour l'inversion sur les mesures de la réflectance.

Paramètre	Jour	Heure solaire	Vert	Rouge	PIR	<i>skyl</i>	LAI étalonnage	LAI test
$\rho_F(\lambda)$	Tous	-	0.1369	0.0592	0.4550	-	-	-
$\tau_F(\lambda)$	Tous	-	0.1354	0.0490	0.4888	-	-	-
$\rho_S(\lambda)$	151	13.46	0.163	0.227	0.345	0.104	0.152	0.049
	163	11.07	0.201	0.273	0.402	0.231	0.988	0.324
	167	12.92	0.209	0.283	0.414	0.162	1.364	0.743
	179	12.99	0.180	0.247	0.371	0.174	3.646	1.770
	184	12.65	0.214	0.290	0.422	0.249	3.570	-
	192	12.33	0.145	0.204	0.316	0.131	3.910	-
	205	11.68	0.140	0.198	0.308	0.169	4.186	4.155
	215	13.12	0.107	0.160	0.252	0.108	4.505	-

Le paramètre θ_L a été calculé par inversion de SAIL à partir de mesures de la réflectance du couvert réalisées sur les deux cultures, d'étalonnage et de test, de façon à vérifier l'indépendance du résultat vis à vis des conditions de culture.

La Figure 4-32 montre l'évolution de θ_L au cours du temps et en fonction du LAI pour les 2 situations. On constate que θ_L est généralement plus élevé en début du cycle de croissance, décroît au cours de la moitié du cycle et réaugmente en fin de saison. Représentant en fonction de LAI permettra de donner des valeurs de θ_L à partir des sorties du modèle SUCROS. Ce résultat conforte ceux exposés au Chapitre 3, et qui nous serviront de règle pour la détermination de θ_L dans la suite du travail. Il semble que le port soit légèrement différent aux deux dernières dates pour la culture test, dont la densité (nb plantes·m⁻²) est plus faible.

4.3 SUCROS et SAIL couplés

4.3.1 Simulation des réflectances de la cultures

Une fois les deux modèles étalonnés, ils ont été couplés pour permettre la simulation de la croissance de la culture et de sa réflectance au cours du temps. Les réflectances n'ont été simulées que pour les jours où les paramètres de SAIL étaient mesurés. La Figure 4-33A permet de vérifier que le modèle couplé simule relativement bien les mesures de réflectance de la situation sur laquelle il a été étalonné.

Cependant, le test précédent n'est en aucun cas une validation, une évaluation spécifique est nécessaire en testant l'aptitude du modèle couplé à simuler la réflectance du couvert de la culture test, pour laquelle on suppose les paramètres d'implantation connus. Cette fois encore la simulation apparaît satisfaisante (Figure 4-33B).

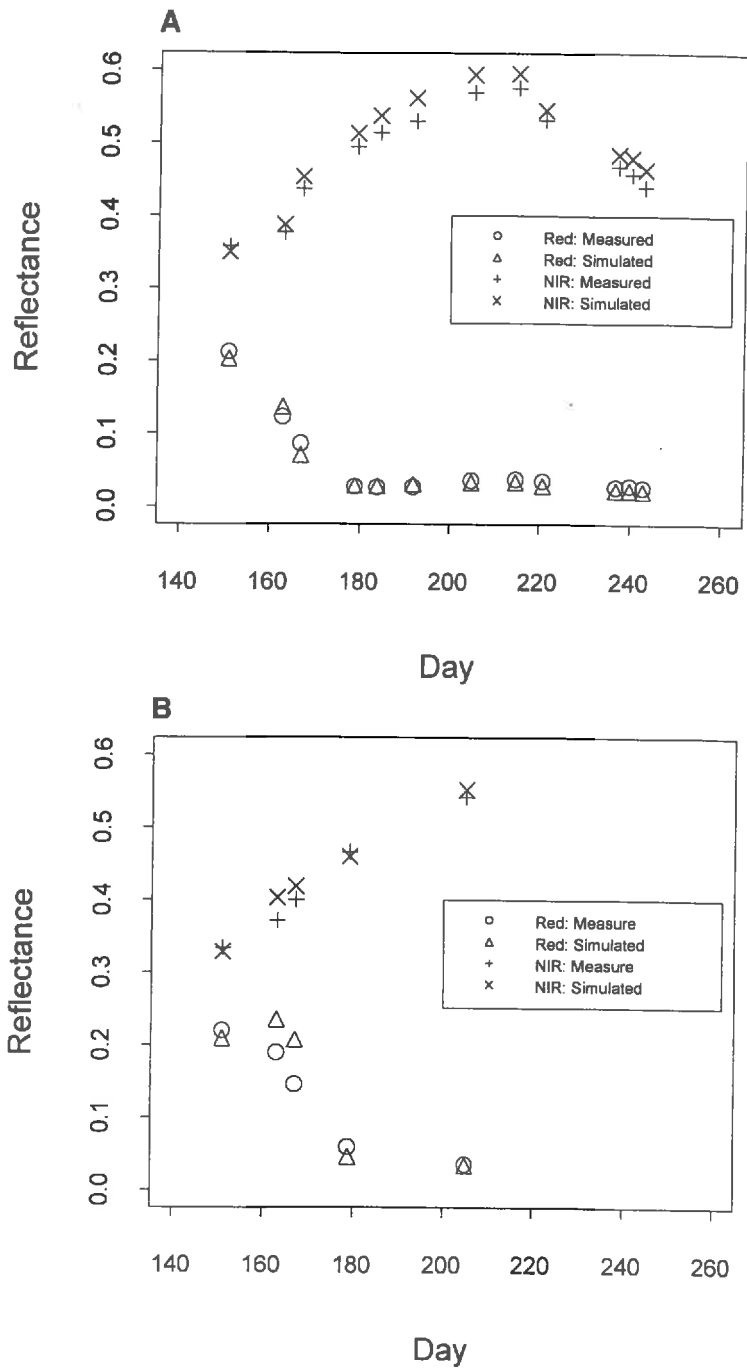


Figure 4-33. Simulations des réflectances par les modèles couplés pour les deux cultures A) étalonnage et B) test, alimentées avec leurs paramètres d'implantation spécifiques.

4.4 Conclusions partielles

A l'issue de ce chapitre, on dispose d'un modèle couplé SUCROS+SAIL, étalonné sur une culture représentative des cultures de betterave dans la région et croissant en conditions optimales.

Pour ce faire, nous avons dû modifier certains paramètres du modèle SUCROS. Les deux principales modifications faites touchent à la répartition des assimilats (vers une précocité plus grande de la baisse de priorité des feuilles) et à la photosynthèse (vers des capacités photosynthétiques plus grandes). Bien qu'on ne dispose pas de références, ces deux aspects qui vont dans le sens d'une plus grande productivité pourraient être le fruit de l'amélioration génétique.

Le modèle SAIL, lui, doit pour fonctionner correctement être alimenté de façon précise en valeurs de ses paramètres. Si les paramètres de configuration d'éclairement et de visée sont aisés à déterminer, les paramètres liés au sol ou à la plante sont plus difficiles à connaître, surtout lorsqu'on s'intéresse à de grands domaines d'espace. De la méconnaissance de ces paramètres peuvent découler des erreurs qu'il est important d'évaluer: c'est l'objet du prochain Chapitre.

La mise en oeuvre de ce modèle couplé pour assimiler des données de télédétection acquises sur des cultures de betterave sera elle abordée au Chapitre 6.

Analyse des erreurs sur les estimations de réflectance

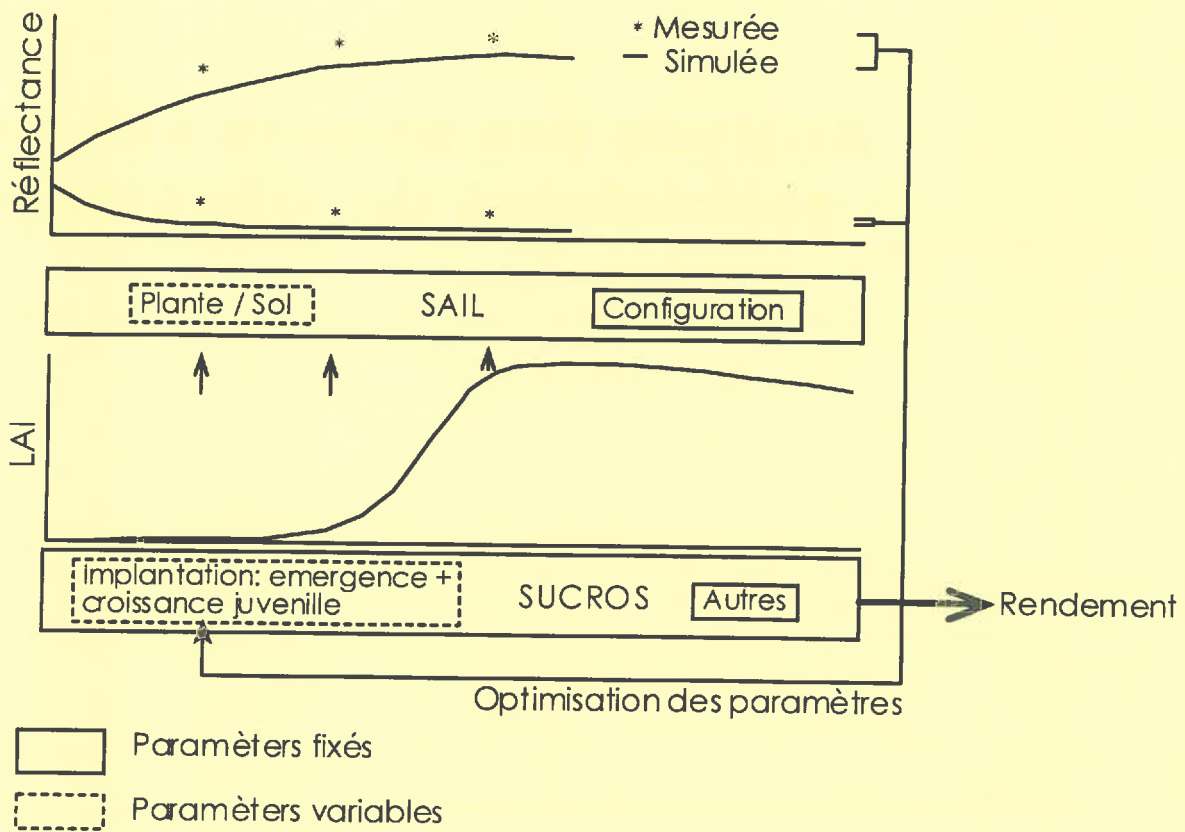


Figure 5-1. Statut des paramètres de SUCROS et SAIL dans le modèle couplé utilisé pour l'assimilation des mesures de réflectance.

5. Analyse des erreurs sur les estimations de réflectance liées au mode d'estimation des paramètres du modèle SAIL

5.1 Introduction

La situation expérimentale particulière que nous avons créée pour tester la faisabilité de la méthode de correction du modèle SUCROS par assimilation de données de télédétection (cf. 6-2), n'a volontairement fait varier que les paramètres de SUCROS concernant la phase d'implantation. Tous les autres paramètres, et particulièrement ceux de SAIL étaient contrôlés (réflectance du sol) ou n'ont pas été affectés: les propriétés optiques des feuilles n'avaient pas de raison d'être modifiées, puisque les conditions optimales de croissance ont été assurées dans les deux situations; tout au plus, le port foliaire a été modifié légèrement avec la modification de la densité de peuplement.

La situation est très différente lorsque l'on envisage l'application de la méthode sur de grands domaines d'espace: il existe en effet à cette échelle une grande diversité de situations culturelles, d'origine pédoclimatique ou technique, qui induit une grande variabilité sur les paramètres associés des modèles. Il est facile d'imaginer que selon le type de sol (limon à réchauffement printanier plus rapide ou craie à réchauffement plus lent), et les techniques utilisées pour la préparation du sol et le semis, les paramètres décrivant l'implantation dans SUCROS peuvent être différents (cf. Chapitre 2): ce sont eux que nous cherchons à ré-étalonner par assimilation des données de télédétection dans le modèle couplé SUCROS+SAIL. La diversité des situations culturelles s'exprime également par les caractéristiques du sol (sa réflectance spectrale, variable selon le type de sol, son humidité, et sa rugosité) et de la végétation (propriétés optiques et angles des feuilles qui varient selon les carences minérales et les stress hydriques subis), qui interviennent dans le modèle SAIL. A cette dimension spatiale de la variabilité des paramètres, s'ajoute bien sûr une dimension temporelle, avec l'évolution des caractéristiques du sol et du couvert au cours du temps.

Sur la Figure 5-1 qui représente schématiquement la méthode de ré-étalonnage du modèle couplé SUCROS+SAIL par assimilation des données de télédétection, à appliquer à chaque point (parcelle) du domaine d'espace, on a représenté les paramètres des deux modèles par des caractères différents selon leur statut:

- les paramètres fixes:
 - * pour SUCROS, il s'agit de ceux qui n'entrent pas dans le ré-étalonnage parce que, même si on ne connaît pas leur valeur pour chaque situation, on considère qu'ils ont une validité générale: ce sont tous les paramètres autres que ceux de la phase d'implantation;
 - * pour SAIL, ils s'agit des paramètres liés à la configuration de l'éclairage et de la visée au moment de la mesure, qui sont toujours connus.

- les paramètres variables:
 - * pour SUCROS, il s'agit des paramètres décrivant l'implantation, et sur lesquels porte notre méthode de ré-estimation par assimilation des données de télédétection;
 - * pour SAIL, il s'agit des paramètres liés au sol et à la végétation, qui varient dans l'espace et dans le temps, et qui, pour que l'estimation de rendement soit possible, doivent être renseignés pour chaque situation.

C'est sur ce dernier groupe de paramètres que nous faisons porter notre étude dans ce Chapitre. En effet, pour appliquer la méthode de correction du modèle de culture par assimilation des données de télédétection dans le modèle couplé SUCROS+SAIL et estimer le rendement en chaque point (ou parcelle) de l'espace, il est nécessaire de connaître, pour chaque jour où une information de télédétection est disponible, et en chaque point, les valeurs des paramètres à fournir au modèle SAIL. Nous nous proposons de comparer deux méthodes d'estimation de ces paramètres: l'une consiste à proposer des valeurs moyennes sans aucune connaissance a priori des valeurs probables; l'autre, basée sur une analyse préalable de la variabilité régionale des paramètres (gammes de variation, règles d'association entre valeurs), consiste à proposer des valeurs mieux adaptées à chaque situation. Nous nous attacherons dans un premier temps à proposer une méthode de production d'information sur ces paramètres, basée sur l'analyse des données régionales présentées au Chapitre 3: à partir des mesures et des sources identifiées de la variabilité des paramètres sol et plante, nous dégagerons des règles pour l'estimation des paramètres à fournir au modèle SAIL pour l'ensemble des situations possibles.

Nous analyserons dans un deuxième temps les erreurs qu'entraînent ces deux modes de détermination des paramètres sur les estimations de réflectances produites par le modèle SAIL pour des stades différents de la culture (figurés par des niveaux différents de LAI). Ces erreurs seront estimées par référence à des données de réflectance "vraies". Comme nous ne disposons pas de mesures de réflectances sur un nombre suffisant de situations faisant varier largement le niveau de LAI et les paramètres sol et plante, nous avons reconstitué une base de données synthétiques, que nous appellerons dans la suite réflectances "vraies", à partir de tirages aléatoires dans les distributions des paramètres observées dans les données régionales, et selon les règles d'association qui ont été définies précédemment.

Les analyses d'erreurs (ou de sensibilité) liées aux paramètres des modèles de réflectance sont nombreuses (ex. Baret et Podaire, 1988; Bouman, 1991; ...). Elles sont généralement réalisées paramètre par paramètre, dans des gammes assez étendues des valeurs possibles du paramètre, mais sans considérer ni les valeurs probables des paramètres, ni les associations entre paramètres et les effets combinés qui en résultent.

L'étude que nous proposons ici, basée sur une analyse préalable de la variabilité des paramètres rencontrée dans les conditions où l'on appliquera le modèle couplé, propose une délimitation des valeurs possibles des paramètres et de leurs relations, ainsi qu'une quantification réaliste des erreurs qui seront engendrées sur les estimations de réflectance.

Tableau 5-1. Description des classes d'humidité et de rugosité considérées.

Humidité (en g d'eau pour 100g de sol)		Sec (1-5)	Intermédiaire (5-15)	Humide (15-25)
distribution		uniforme	uniforme	uniforme
moyenne, écart-type		3.0, 0.3	10.0, 1.0	20.0, 2.0
Rugosité		sol non biné		sol biné
fréquence:		0		1
avant LAI=0.75		100.%		0.0%
après LAI=0.75		80.0%		20.0%

Tableau 5-2. Paramètres des courbes caractéristiques réflectance-humidité pour les différentes classes de rugosité (cf. Eq. 3-18). Cas du LM (limon moyen).

Paramètres des courbes réflectance-humidité	Rugosité					
	0			1		
	vert	rouge	pir	vert	rouge	pir
Reflectance maxi (ρ_x)	0.246	0.064	0.763	0.164	0.054	0.112
Reflectance mini (ρ_n)	0.330	0.116	0.083	0.237	0.088	0.116
Coefficient α	0.468	0.164	0.065	0.338	0.143	0.101

5.2 Méthodes

5.2.1 Etude de la variabilité des paramètres de SAIL à l'échelle régionale

Nous utiliserons ici les mesures qui ont été présentées au Chapitre 3.

Les paramètres de SAIL dont nous avons mesuré la variabilité et pour lesquels nous cherchons à définir des règles sont:

- les paramètres du sol qui s'expriment par la réflectance du sol dans les 3 bandes spectrales d'intérêt;
- les paramètres végétation qui s'expriment par les propriétés optiques spectrales des feuilles et les angles foliaires.

Nous présenterons pour ces deux catégories de paramètres:

1. la description de la variabilité (lois d'évolution, caractérisation de la distributions des valeurs); et
2. la définition des règles pour représenter ces valeurs dans le modèle SUCROS+SAIL

5.2.2 La réflectance du sol

Elle dépend essentiellement du type de sol, de son humidité de surface et de sa rugosité. On a vu au Chapitre 3, les différents types de sols présents dans la zone d'étude sur laquelle sera faite la validation de la méthode, ainsi que les relations réflectance-humidité qui les caractérisent pour différents états de rugosité (surface binée ou non) (Tableau 3.8, Tableau 3.8, et Figure 3-27). La catégorie de sols prédominante dans la région est celle des limons moyens (LM) en situation de plateau avec, par endroits, des affleurements de craie (C), et des colluviums de limons argileux (LA). C'est sur le limon moyen que nous ferons l'étude détaillée, et nous étendrons les résultats aux sols de craie et aux limons argileux. L'humidité de surface (0-2.5mm) évolue très rapidement selon le régime des pluies. Généralement, après une pluie, et avec les niveaux d'ETP que l'on rencontre au printemps, la surface du sol est sèche après deux jours sans pluie (Richard, comm. pers.). La rugosité du sol évolue lentement au début de la culture entre celle d'un lit de semences frais et celle d'un lit de semence dégradé par l'action des pluies (rugosités faibles dans les 2 cas). Elle peut être fortement augmentée par l'action du binage qui intervient à peu près au moment où les plantes commencent à se recouvrir sur le rang et où les interrangs sont encore bien dégagés (cela correspond à peu près au stade 0.75LAI de SUCROS). Tous les agriculteurs ne pratiquent pas le binage: la fréquence observée de binage dans la région est d'environ 20%.

Les règles qui permettent de déterminer la réflectance du sol pour une parcelle donnée à un instant donné sont (Tableau 5-1 et Tableau 5-2):

- Le type de sol, lisible sur la carte pédologique de l'Aisne au 1/25 000, est connu.
- L'humidité du sol, définie par son appartenance à l'une des 3 classes de valeurs: "sec" (<5% pondéral), "intermédiaire" (5-15%) ou "humide" (>15%) est connue à partir des données météorologiques par le nombre de jours sans pluie et le niveau d'évaporation des jours antérieurs au jour de la mesure.

Tableau 5-3. Caractéristiques des paramètres végétation.

		LAI < 2.0		LAI > 2.0	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Réflectance:	Vert	0.137	0.0147	0.148	0.014
	Rouge	0.059	0.0072	0.065	0.0075
	PIR	0.455	0.0004	0.457	0.0003
Transmittance:	Vert	0.135	0.0161	0.147	0.0153
	Rouge	0.049	0.0105	0.057	0.071
	PIR	0.49	0.0004	0.49	0.0004
θ_L :		60.0	6.0	45.0	4.5
Hot spot:		0.3	-	0.3	-

- La rugosité du sol est toujours faible ($=0$) avant le stade $0.75LAI$; après ce stade, la rugosité est dans 20% des cas celle d'un sol biné (rugosité plus forte, $=1$), dans 80% des cas elle reste de type 0.

La connaissance de ces trois paramètres permet de déterminer une réflectance spectrale de sol, en utilisant les relations réflectance-humidité de surface établies au Chapitre 3.

5.2.2.1 Les paramètres de la végétation

On a vu au chapitre 3 que les propriétés optiques des feuilles et les angles foliaires évoluent avec l'âge du couvert et en fonction des conditions d'alimentation hydrique et minérale. Nous avons utilisé les données de l'expérimentation réalisée sur l'effet de la nutrition azotée sur la croissance de la betterave (en excluant les résultats obtenus avec les doses 0 et 50 N) pour quantifier l'ordre de grandeur de la variabilité de ces paramètres et dériver les règles de leur détermination pour une parcelle donnée à un instant donné.

On constate que, en début de culture, jusqu'à un stade foliaire de l'ordre de 2, les stress n'apparaissent pas encore: les propriétés optiques sont celles de feuilles bien vertes et l'angle moyen θ_L assez élevé (autour de 60°) (cf. Figures 3-31). Au cours du temps, on observe une diminution des angles foliaires; par ailleurs, avec l'apparition de conditions plus limitantes, on assiste à une évolution conjointe des propriétés optiques dans le vert et le rouge: diminution de la teneur en azote et en chlorophylle des feuilles, et donc augmentation de la réflectance et de la transmittance, accompagnée d'une augmentation des écarts-types.

Les règles que nous avons définies pour la détermination des paramètres liés à la végétation sont indexées à son état de développement:

- l'état de développement est exprimé non pas en temps mais en niveau d'indice foliaire. On a vu qu'en effet le LAI permettait bien de décrire les évolutions observées, et il sera toujours accessible dans la mise en oeuvre de la méthode puisqu'il est la variable de couplage entre les deux modèles, sortie de SUCROS et entrée de SAIL.
- On considère deux périodes: de la levée à $LAI=2$, et après $LAI=2.0$. Les valeurs moyennes et les écarts-types de θ_L , ρ_r et τ_r pour ces 2 périodes sont figurées au Tableau 5-3.

5.2.3 Estimation des erreurs sur les estimations de réflectance du couvert

L'étude d'erreur que nous avons réalisée consiste à analyser les écarts entre les réflectances "vraies" de la base de données synthétiques, avec des paramètres sol et végétation tirés au hasard dans les distributions observées dans les données régionales, et des réflectances simulées avec des jeux standard de ces paramètres, déterminés avec ou sans connaissance préalable.

Nous avons également analysé les erreurs induites sur les indices de végétation calculés à partir de ces réflectances. En effet, la plupart de ces indices ont été construits pour tenter d'atténuer l'effet perturbateur de certains des paramètres étudiés, ainsi que d'autres (effets atmosphériques...), et nous

chercherons à dégager leur intérêt vis à vis du problème spécifique des erreurs induites par l'incertitude sur les paramètres de SAIL.

5.2.3.1 Création de réflectances de synthèse par la technique de simulation Monte Carlo

La technique de simulation Monte Carlo permet de générer des distributions des résultats du modèle à partir de tirages des valeurs des paramètres en entrée dans des distributions déterminées.

Nous avons utilisé cette technique pour créer une base de données de réflectances synthétiques qui représentent les réflectances qui pourraient être mesurées par télédétection sur des situations "réelles", à l'échelle de notre région d'étude.

Les conditions des simulations étaient les suivantes:

- **LAI:**

on fixe 10 niveaux: 0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0

- **Paramètres Sol:**

On renseigne des paramètres suivants:

- type de sol: choix d'un sol de référence: LM (limon moyen) (on présentera également des résultats sur LA (limon argileux) et C (craie));

- humidité de surface: uniformément réparties dans les 3 classes d'humidité (cf. Tableau 5-1), on fait 500 tirages par classe d'humidité;

- rugosité: elle est toujours de type 0 (lisse) avant LAI=0.75, 4 fois sur 5 de type 0 et 1 fois sur 5 de type 1 (rugueux) après ce stade (cf. Tableau 5-1);

La réflectance spectrale du sol est ensuite déterminée grâce aux courbes réflectance-humidité (cf. Tableau 5-2 pour le LM).

- **Paramètres Végétation:**

- les propriétés optiques et les angles foliaires sont tirés au sort dans des distributions normales de moyenne et écart-type définis dans le Tableau 5-3, en fonction du niveau de LAI.

On travaille pour un type de sol donné (le détail des résultats sera donné pour le LM). Pour chaque niveau de LAI, on fait 500 tirages par classe d'humidité du sol, ce qui donne 1500 réflectances de sol. A chacune de ces situations de réflectance de sol et de niveau de LAI, on associe des paramètres végétation tirés dans leurs distributions caractéristiques. L'entrée de ces paramètres dans SAIL permet de simuler 1500 réflectances de couvert par niveau de LAI, soit au total 15000 qui représentent une certaine image de la variabilité existant à l'échelle d'une région (pour un type de sol). L'analyse a été complétée en renouvelant ce processus pour d'autres types de sol (LA et C).

Tableau 5-4. Valeurs des paramètres "standard" de SAIL pour les deux options et paramètres de configuration utilisés pour les simulations.

Paramètre	Option 1		Option 2	
	$LAI \leq 6.0$	$LAI < 2.0$	$2.0 \leq LAI \leq 6.0$	
Végétation:				
Réflectance feuille				
Vert:	0.145	0.137		0.148
Rouge:	0.063	0.059		0.065
PIR:	0.456	0.455		0.457
Transmittance feuille				
Vert:	0.144	0.1353		0.147
Rouge:	0.055	0.0490		0.057
PIR:	0.490	0.490		0.490
Angle moyen des feuilles	50.0°	60.0°		45.0°
Hot spot	0.3	0.3		0.3
Sol:				
Type	LM	LM, LA, C	LM, LA, C	LM, LA, C
Rugosité (classe)	0	0	0	0
Humidité (classe) (% pondéral)	Sec 5.0	Sec 5.	Interméd. 10.	Humide 20.
Reflectance du sol:				
Vert:	0.175	0.195	0.144	0.117
Rouge:	0.244	0.268	0.204	0.171
PIR:	0.361	0.390	0.313	0.271
Paramètres de configuration:				
Angle de visée	0.0 rad		0.0 rad	
Angle zénithal	0.5 rad		0.5 rad	
Différence d'azimuts	0.0 rad		0.0 rad	
Fraction diffuse dans le rayonnement spectral incident	0.2		0.2	

5.2.3.2 Méthode de mesure de l'erreur

Ces réflectances "vraies" serviront de référence pour le calcul de l'erreur commise lorsqu'on utilise pour SAIL des jeux de paramètres standard. Nous avons choisi deux façons de déterminer ces jeux de paramètres standard (Tableau 5-4):

- **option 1:** les paramètres sont fixés sans une connaissance préalable de la réalité. Ce sont des valeurs fixes pour l'ensemble du cycle. Dans les travaux portant sur ce sujet, ces valeurs sont soit issues d'essais peu nombreux en situation expérimentale (Bouman, 1991), soit directement de la littérature (Moulin, 1995). Nous avons choisi de prendre le sol le plus commun dans la région (LM), à l'état sec, et de prendre pour les paramètres végétation les valeurs moyennes observées (ce qui représente déjà une certaine connaissance *a priori*!...);
- **option 2:** on s'autorise un certain niveau d'informations disponibles et de connaissances *a priori* sur les paramètres. On considérera que:
 - * le type de sol est connu (dans la pratique, on pourra disposer de cartes des sols qui renseigneront sur la nature du sol de chaque parcelle dans un Système d'Information Géographique);
 - * son humidité de surface, définie par son appartenance à l'une des 3 classes est déterminée à partir des données météorologiques par le nombre de jours sans pluie et le niveau d'évaporation des jours antérieurs au jour de la mesure; et
 - * sa rugosité est du type le plus fréquent (0).

Sa réflectance peut donc être estimée avec les valeurs moyennes du Tableau 5-2.

Les paramètres végétation sont déterminés en fonction du niveau de LAI grâce aux valeurs moyennes du Tableau 5-3.

On trouve également dans le Tableau 5-4 les paramètres de configuration de la mesure que nous avons choisis pour faire les simulations: angle zénithal du soleil (28.6°), de la visée (au nadir), différence d'azimut entre éclairage et visée (0), proportion de rayonnement diffus dans le rayonnement spectral incident (20%, ce qui correspond à une belle journée). On y trouve aussi le paramètre caractéristique de la culture dans la description de l'effet de *hot-spot* dans SAIL exprimant le rapport entre largeur des feuilles et hauteur du couvert.

On mesure l'erreur faite en utilisant ces le jeu de paramètres de l'option "opti" (sans et avec connaissance *a priori*) par comparaison avec la réflectance "vraie", en calculant, pour chaque niveau de LAI, l'erreur relative moyenne Er_{opti} :

$$ER_{opti} = \frac{n}{\sum(\rho_{vrai})} \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\rho_{vrai} - \rho_{opti})^2}$$

Eq. 5-1

où ρ_{opti} est la réflectance simulée avec l'option *opti*,

ρ_{vraie} est la réflectance "vraie" synthétique,

n est le nombre de répétitions (500 par classe d'humidité, 1500 toutes humidités confondues).

La normalisation des erreurs permet de les comparer pour différents niveaux de LAI (l'ordre de grandeur de la réflectance variant fortement avec le niveau de LAI).

Dans le cas des indices de végétation, la même erreur relative est calculée.

Pour mieux comprendre le sens des erreurs, on regardera également les distributions des erreurs absolues ($\rho_{vraie} - \rho_{opti}$).

5.2.3.3 Indices de végétation

On a vu (Chapitre 2) que plusieurs indices ont été proposés pour rendre les mesures de télédétection moins sensibles aux facteurs externes, essentiellement brillance du sol et effets atmosphériques. Ces indices sont construits généralement à partir des réflectances Rouge et PIR, et sont équivalents à des mesures d'angles ou de distance, prenant en compte ou non la droite des sols. Parmi ces indices, nous en avons retenu quatre pour cette analyse de la sensibilité aux erreurs liées à la méconnaissance des paramètres du modèle de réflectance: NDVI, WdVI, TSAVI, et GEMI, qui illustrent chacun une catégorie d'indice. On rappelle ici les formules:

$$NDVI = (\rho_{PIR} - \rho_R) / (\rho_{PIR} + \rho_R)$$

Eq. 5-2

$$WdVI = \rho_{PIR} - a \cdot \rho_R$$

Eq. 5-3

$$TSAVI = a \cdot (\rho_{PIR} - a \cdot \rho_R - \rho_{PIR}) / (a \rho_{PIR} + \rho_R - a \cdot b + X \cdot (1 + a^2))$$

Eq. 5-4

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - ((\rho_R - 0.125) / (1 - \rho_R))$$

où

$$\eta = [2(\rho_{PIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{PIR} + 0.5\rho_R] / (\rho_{PIR} + \rho_R + 0.5).$$

Eq. 5-5

Les paramètres a et b des droites des sols sont ceux qui ont été établis pour les différents types de sols au Chapitre 3.

5.3 Résultats

5.3.1 Les réflectances simulées

5.3.1.1 Les réflectances "standard"

Les réflectances "standard" simulées avec les deux options sont représentées à la Figure 5-2.

L'humidité du sol a un poids important sur la détermination de la réflectance du couvert jusqu'à LAI=2 pour les bandes vert et rouge, et jusqu'à LAI=3 pour le proche infrarouge où les feuilles ont une transmittance plus forte. Cela résulte dans une grande variabilité des réflectances jusqu'à LAI=2. Il y a ensuite une augmentation abrupte de la réflectance dans le proche infrarouge au delà de LAI=2 à cause du changement de port foliaire. Elle est plus marquée sur le sol humide car c'est là que la réflectance de sol et celle des feuilles sont les plus différentes. Quand l'angle foliaire diminue, le sol devient moins visible: sa contribution à la réflectance du couvert diminue (cette dernière augmente alors dans le pir et diminue dans le rouge et le vert); c'est alors l'angle foliaire qui joue un rôle important.

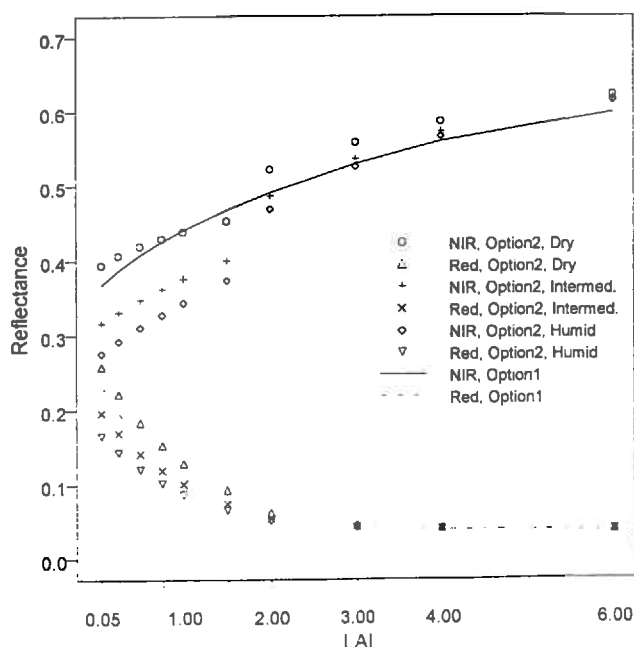


Figure 5-2. Réflectances Rouge et PIR "standard" simulées avec les options 1 et 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL.

Avec l'option 1 on ne trouve évidemment aucune de ces variations: tous les paramètres sont considérés comme constants et la réflectance du couvert ne dépend que du LAI.

Les variations observées avec l'option 2 et la différence entre les deux options illustrent le rôle de ces paramètres sur la détermination de la réflectance du couvert et l'importance de la bonne détermination de leurs valeurs.

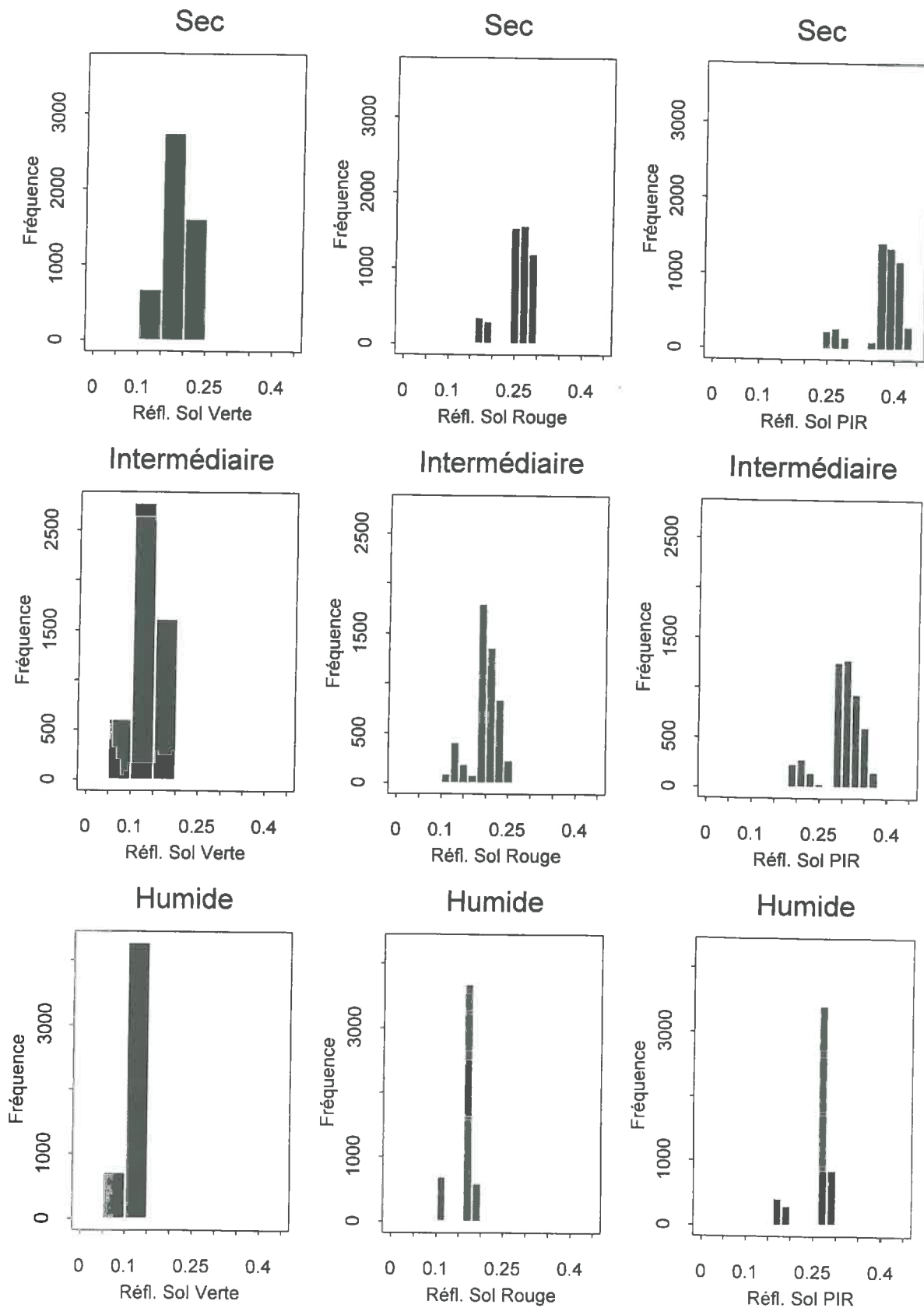


Figure 5-3. Histogrammes des réflectances de sol pour les 3 bandes spectrales, par classe d'humidité. Sol de type LM.

5.3.1.2 Les réflectances synthétiques "vraies"

Distribution des paramètres

La première étape dans le processus de simulation Monte Carlo est le tirage aléatoire des paramètres dans les distributions données. On a vérifié que les résultats de ces tirages donnent des histogrammes conformes aux distributions de départ. Ceux relatifs aux réflectances de sol (Figure 5-3), construits pour chaque classe d'humidité, montrent la grande variabilité qui a été créée et qui va contribuer fortement à la perturbation des réflectances de couvert. On retrouve globalement la décroissance des réflectances en fonction de l'humidité de surface. On trouve par ailleurs une allure bimodale dans tous les histogrammes, correspondant aux situations de sols binés (après LAI=0.75), pour lesquels la forte rugosité abaisse très fortement les valeurs de réflectance dans toutes les bandes spectrales. Bien que les gammes de variation de l'humidité pour la classe "sec" soit faible, les réflectances simulées sont très variables car la pente réflectance-humidité est forte dans cette gamme. La classe "intermédiaire" correspond à des réflectances très variables aussi, à cause de la grande variabilité des humidités qui la composent et la relative sensibilité de la réflectance à l'humidité dans cette gamme d'humidité. Les réflectances de la classe "humide" sont les moins variables.

Distribution des réflectances de couvert simulées

La Figure 5-4 montre les réflectances de couvert simulées pour les bandes rouge et proche infrarouge. Nous les avons représentées pour l'ensemble des situations et, pour plus de clarté, séparément pour chaque classe d'humidité.

On retrouve dans le cas des sols "intermédiaires" et "secs" la grande variabilité due à la variabilité de la réflectance du sol constatée précédemment. De même, on retrouve la plus faible variabilité des sols humides, associées à de plus faibles réflectances. On note l'augmentation importante de la variabilité des réflectances au delà de LAI=0.75, surtout visible pour le PIR, due à l'introduction des situations de sols binés à ce moment. Cet effet s'atténue après LAI=2 à cause de la chute de θ_L , qui diminue la contribution du sol dans la réflectance totale. L'effet de l'introduction de sols binés est atténué dans le rouge (et le vert) à cause de la plus forte absorption du rayonnement dans ces bandes à ces niveaux de LAI.

5.3.2 Mesure des erreurs sur les réflectances

5.3.2.1 Cas du LM

Les réflectances de couvert que nous venons de voir constituent notre base de données synthétiques "vraies". La comparaison avec la Figure 5-2 montre que les jeux de données standard que nous proposons d'utiliser dans le modèle SUCROS+SAIL représentent mal cette réalité, et d'autant plus mal pour l'option 1.

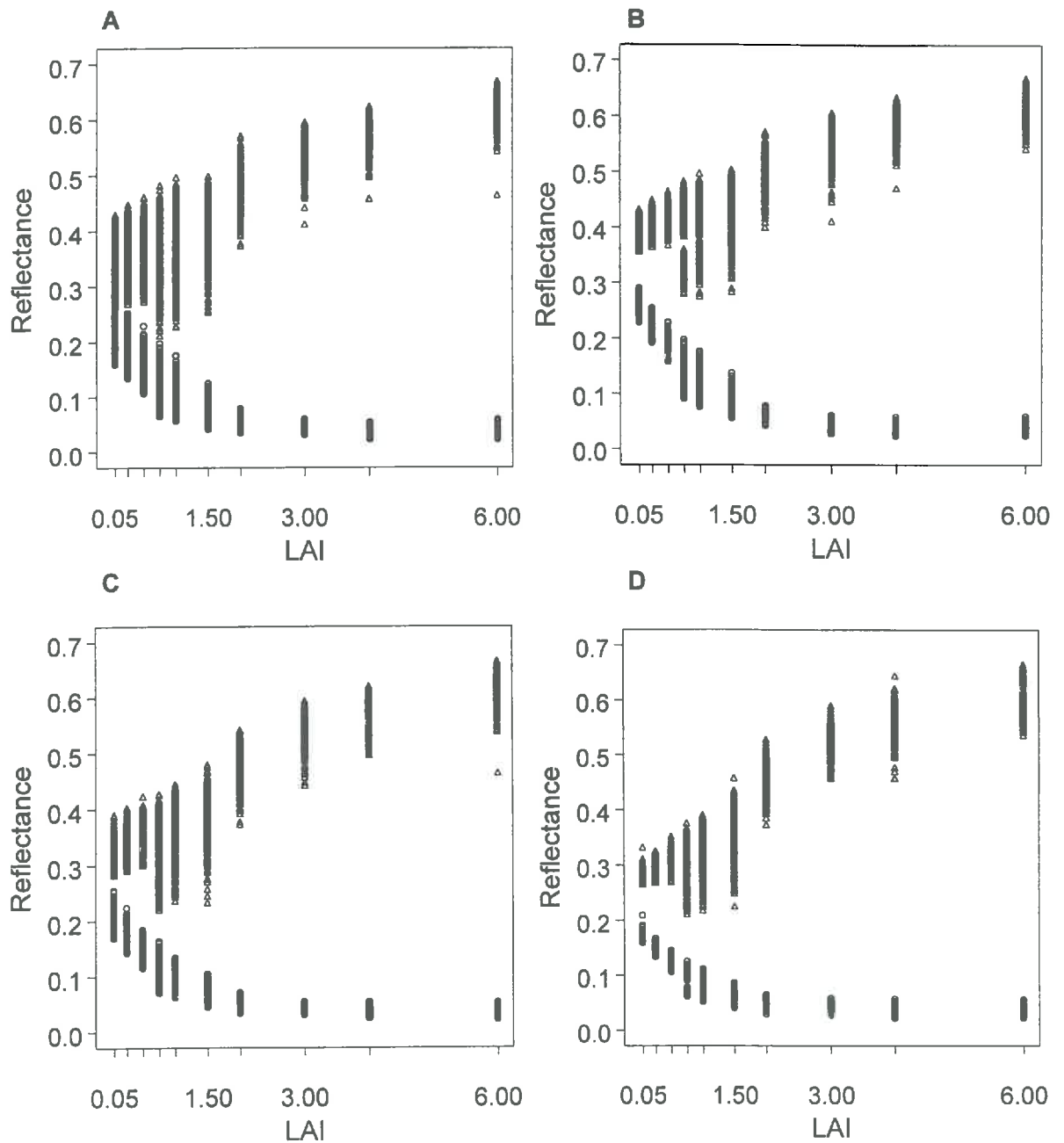


Figure 5-4. Réflectances de couvert Rouge et PIR en fonction du LAI pour différentes classes d'humidité des sols: A) toutes classes confondues, B) sols secs, C) sols intermédiaires, D) sols humides. Sol de type LM.

Erreur relative moyenne

La Figure 5-5 montre, pour les deux options, l'évolution de l'erreur sur les réflectances dans les trois bandes en fonction du LAI. Pour chaque valeur de LAI, on a représenté l'erreur relative moyenne calculée sur les 3 x 500 simulations (cf. Eq. 5-1).

Lorsque l'on utilise les paramètres de l'option 1 pour représenter les réflectances "vraies" (Figure 5-5A), l'erreur commise est très importante (autour de 30%) pour les faibles LAI. Elle est encore accentuée à partir de LAI=0.75 par l'introduction des occurrences de binage (et de la variation de rugosité associée) qui rendent la réflectance du sol très différente de celle choisie dans l'option 1. Les erreurs relatives s'atténuent ensuite avec le développement du LAI et surtout le changement dans la structure qui intervient à LAI=2: elle sont alors liées aux erreurs faites sur les propriétés optiques et la structure. Les niveaux de l'erreur relative continuent à s'abaisser (jusqu'à 5%) dans le PIR avec l'augmentation du LAI au delà de 2 (car la réflectance PIR augmente toujours), alors qu'elle remonte de 12 à 17% dans le vert et le rouge où la réflectance diminue alors que l'erreur reste de même ordre de grandeur.

L'utilisation des paramètres de l'option 2 améliore sensiblement les niveaux des erreurs relatives (Figure 5-5B). C'est particulièrement net pour les faibles LAI où le poids du paramètre réflectance du sol est très important. Sa meilleure détermination dans l'option 2 a pour effet de diminuer de 20 à 8% le niveau de l'erreur relative. L'occurrence du binage n'étant pas prise en compte dans l'option 2, le niveau des erreurs remonte aussi à partir de LAI=0.75, mais moins fortement (à des niveaux de 12 à 18% contre 25 à 35 % dans l'option 1). On retrouve la décroissance des erreurs à partir de LAI=2 et un comportement identique à celui observé dans le cas précédent, mais avec des niveaux d'erreurs relatives plus faibles (de 8 à 4% dans le PIR, de 11 à 14% dans le vert et le rouge).

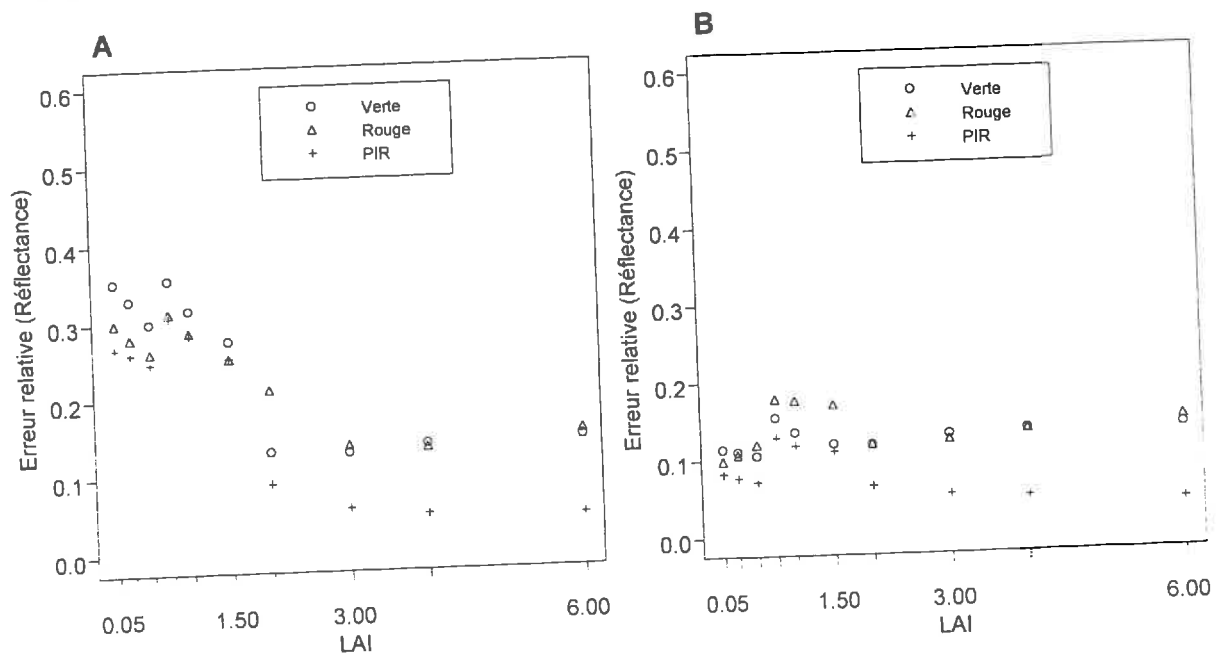


Figure 5-5. Erreurs relatives moyennes sur les réflectances dans les 3 bandes selon les options (réflectance "standard") A) option 1, B) option 2. Sol de type LM, toutes classes d'humidité confondues.

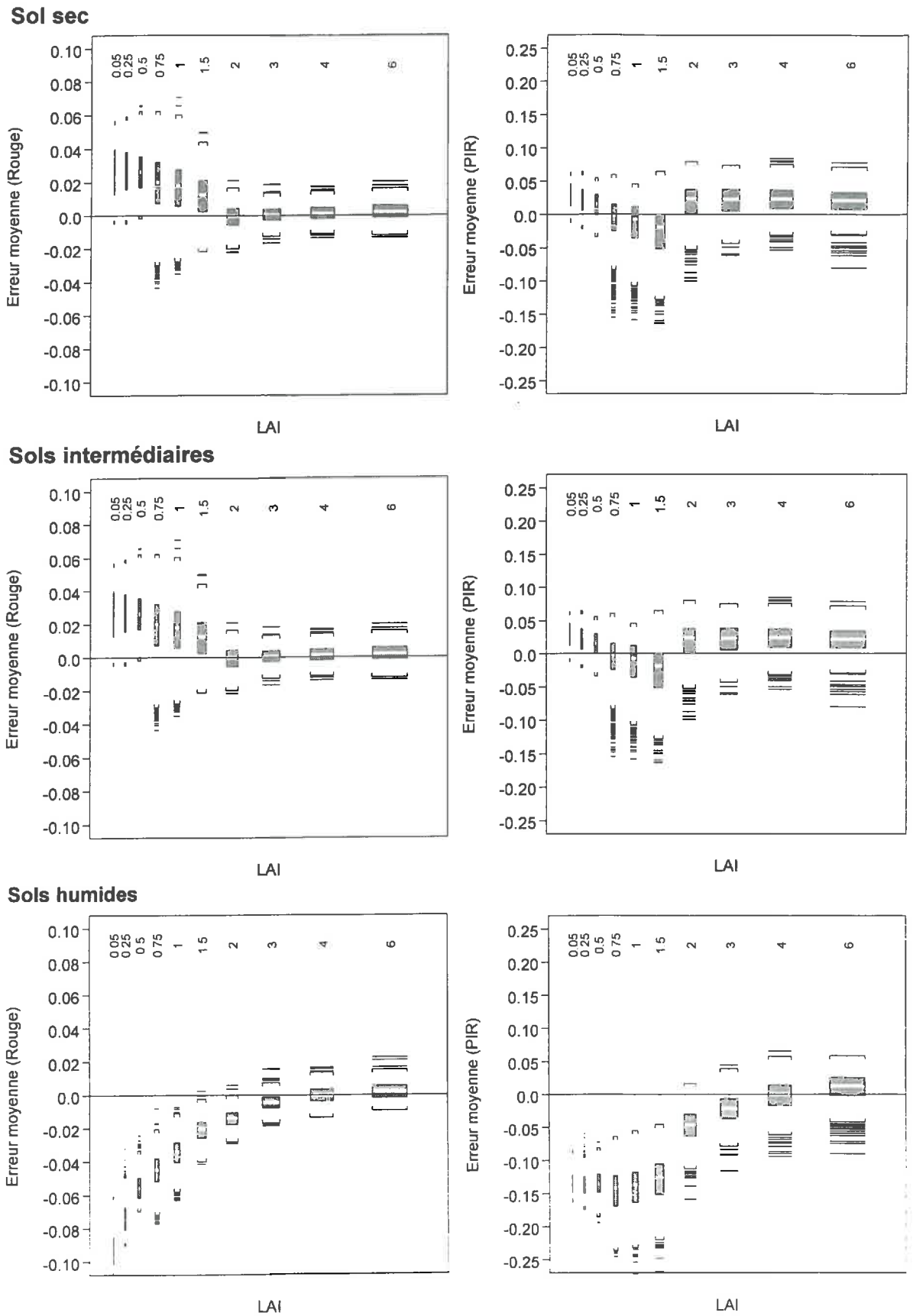


Figure 5-6. Erreurs absolues sur la détermination de la réflectance rouge et PIR avec les paramètres de l'option 1 selon la classe d'humidité du sol. Sol LM.

Distributions des erreurs : Une autre façon d'examiner les erreurs consiste à regarder l'évolution de la distribution des erreurs absolues $\rho_{\text{obs}} - \rho_{\text{opti}}$ en fonction du LAI, qui donne des informations supplémentaires sur le sens et l'amplitude des erreurs. La représentation de ces distributions est donnée dans la Figure 5-6 pour l'option 1 et la Figure 5-7 pour l'option 2. Pour les deux bandes spectrales rouge et PIR, et pour les différentes classes d'humidité des sols, on a représenté ces distributions sous forme de "boxplots" ou "boîtes à pattes". Les boîtes montrent les valeurs du premier (Q_1) et du 3ème quartile (Q_3) (la barre blanche représentant la médiane M); les "pattes" (|) sont placées à une distance de $1.5 \cdot (M - Q_1)$ et les "outliers" sont représentés par des barres(-) à l'extérieur. On a représenté les boxplots pour la bande rouge avec une échelle plus dilatée que pour le PIR.

Dans le cas de l'option 1, on retrouve nettement l'articulation de deux périodes autour d'un niveau de LAI de 2 ou 3 selon les cas. La charnière est représentée par l'atténuation complète de l'influence de la réflectance du sol: c'est plutôt LAI=2 dans le rouge et LAI=3 dans le PIR, mais ces valeurs elles-mêmes sont à nuancer selon le contraste sol/végétation: quand il est fort (sol humide), l'influence du sol se marque encore à LAI=3, quand il est faible (sol sec), elle "disparaît" plus tôt. Les erreurs absolues liées à cet effet sont très facilement interprétables:

- pour les sols secs, la réflectance standard représentée par l'option 1 (cf. Tableau 5-4): $\rho_{\text{solV}} = 0.175$; $\rho_{\text{solR}} = 0.244$; $\rho_{\text{solPIR}} = 0.361$) est inférieure aux réflectances "synthétiques" simulées: les écarts sont nettement positifs, et c'est plus marqué pour le rouge que pour le PIR. Avec l'introduction du binage à LAI=0.75, les écarts, qui étaient en diminution avec l'augmentation du LAI, restent relativement importants (car la différence biné/non biné à ces niveaux élevés de réflectance du sol est importante) et leur variabilité augmente fortement.
- pour les sols intermédiaires, et surtout pour les sols humides, la réflectance standard représentée par l'option 1 (cf. Tableau 5-1: $\rho_{\text{solV}} = 0.175$; $\rho_{\text{solR}} = 0.244$; $\rho_{\text{solPIR}} = 0.361$) est supérieure aux réflectances "synthétiques" simulées: les écarts sont nettement négatifs, surtout pour les sols humides. L'effet de l'introduction du binage à LAI=0.75 est moins net -tant sur les valeurs médianes que sur les étendues - car la différence biné/non biné est plus faible car la différence biné/non biné à ces niveaux de réflectance du sol plus faibles est moins importante. D'une manière générale, la variabilité des erreurs est plus importante pour les sols intermédiaires dont la réflectance de sol est elle-même plus variable.

A partir de LAI=2, le θ_L des réflectances "vraies" diminue et devient inférieur à celui du standard de l'option 1 (cf. Tableau 5-3), ce qui a pour conséquence de "gommer" l'effet du sol. Après LAI=2 ou 3 (cf. commentaire précédant), c'est l'influence des paramètres végétation (angle foliaire et propriétés optiques des feuilles) qui prend le relais de l'influence du sol. Les erreurs sont alors toujours positives à cause du choix des paramètres dans l'option 1 (cf. Tableau 5-4).

La même représentation est faite à la Figure 5-7 pour l'option 2. L'amélioration la plus évidente est la réduction des biais dans les erreurs relatives pour tous les niveaux de LAI. La médiane est toujours très proche de zéro, montrant que les réflectances "vraies" sont centrées autour des valeurs standard calculées avec les paramètres déterminés par l'option 2. Comme attendu, les amplitudes de variation ne sont pas modifiées, aussi bien pour le rouge que pour le proche infrarouge, dans la mesure où cette amplitude est simplement le reflet de la variabilité des données synthétiques.

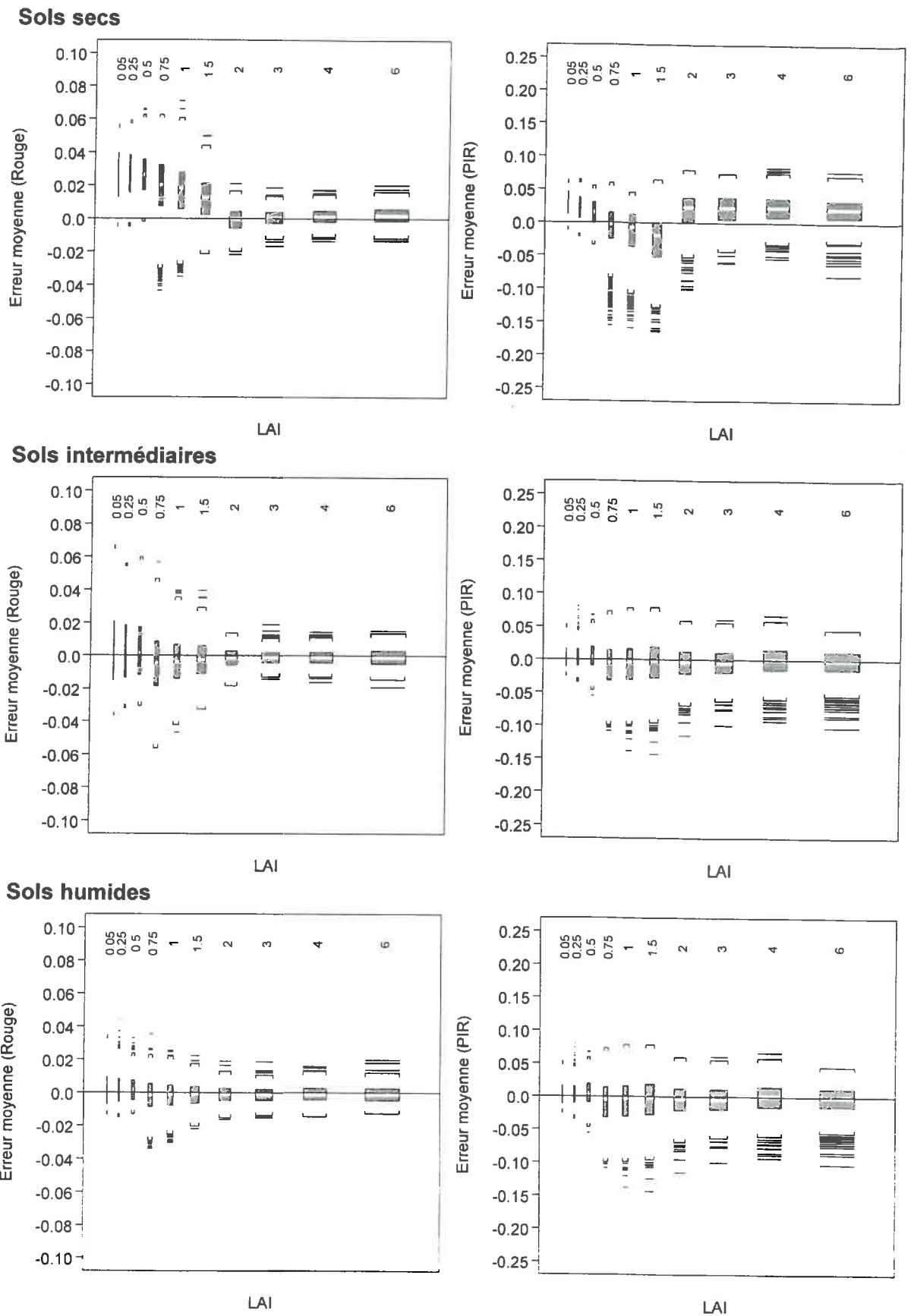


Figure 5-7. Erreurs absolues sur la détermination de la réflectance rouge et PIR avec les paramètres de l'option 2 selon la classe d'humidité du sol. Sol LM.

5.3.2.2 Cas des sols LA et C

L'analyse qui vient d'être faite concerne des sols de type LM, c'est à dire du même type que le sol de référence ou "standard", pris dans l'option 1. Lorsqu'on fait la même analyse pour des sols dont les vraies réflectances sont plus éloignées de ces options "standard" prises pour l'option 1, on constate, comme on peut l'attendre, que l'amélioration apportée par l'option "avec connaissance préalable", l'option 2, est encore plus significative.

La Figure 5-8 illustre cette situation pour les sols de type LA (limon argileux) ou C (craie), avec les erreurs relatives moyennes. On constate que l'erreur faite en déterminant les paramètres sol avec l'option 1 est bien supérieure dans ces 2 cas (elle est de l'ordre de 15 à 60% pour des LAI < 2) au cas du LM, dont les caractéristiques moyennes se rapprochent du standard de l'option 1. On peut mesurer l'intérêt d'une meilleure estimation des paramètres de SAI en constatant que les erreurs associées à l'option 2 sont beaucoup plus faibles et indépendantes du type de sol.

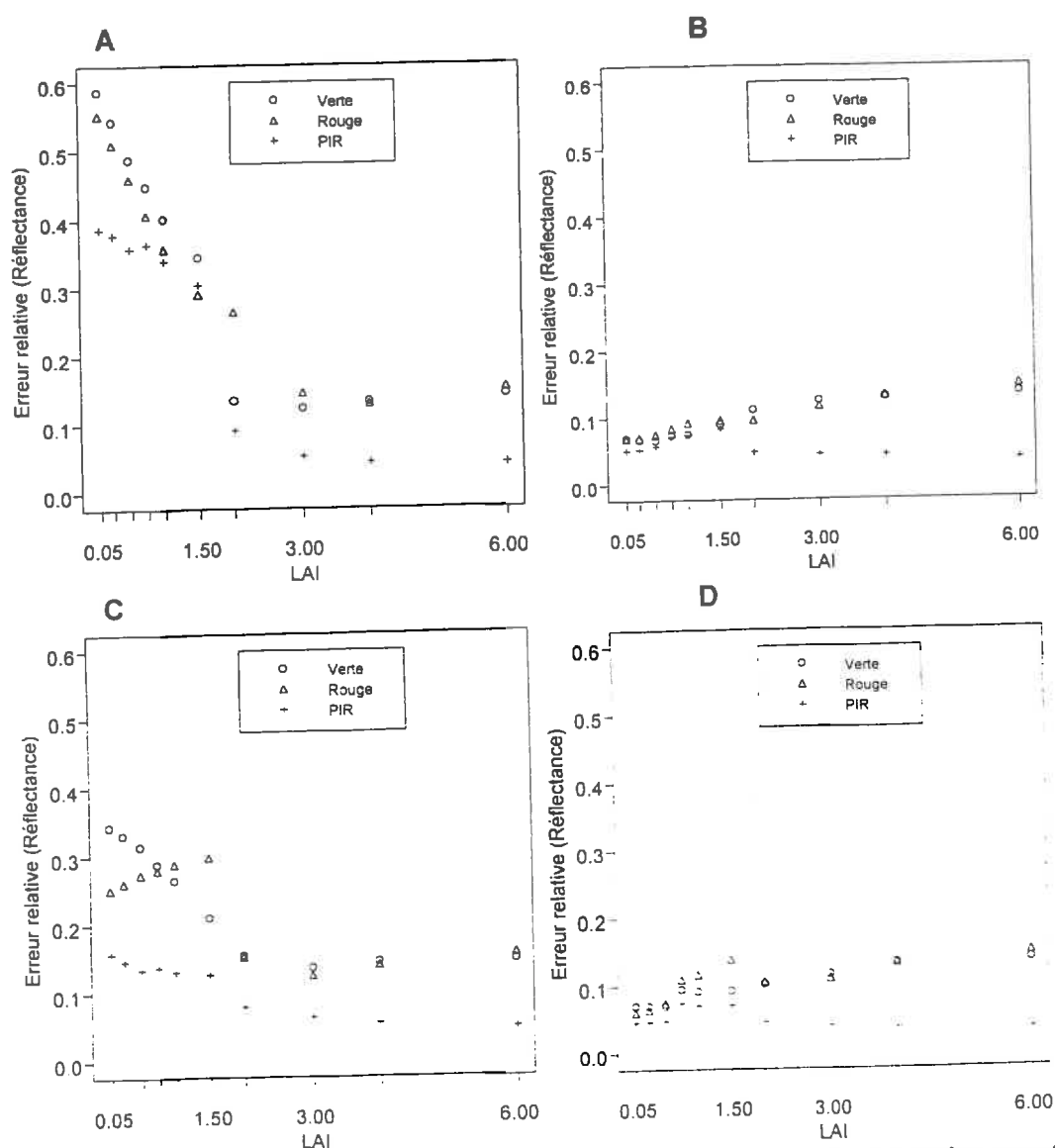


Figure 5-8. Erreurs relatives moyennes sur les réflectances dans les 3 bandes spectrales selon les options utilisées pour la réflectance "standard" (toutes classes d'humidité de sol confondues). A) Sols LA option 1; B) sols LA option 2; C) Sols C option 1; D) sols C option 2.

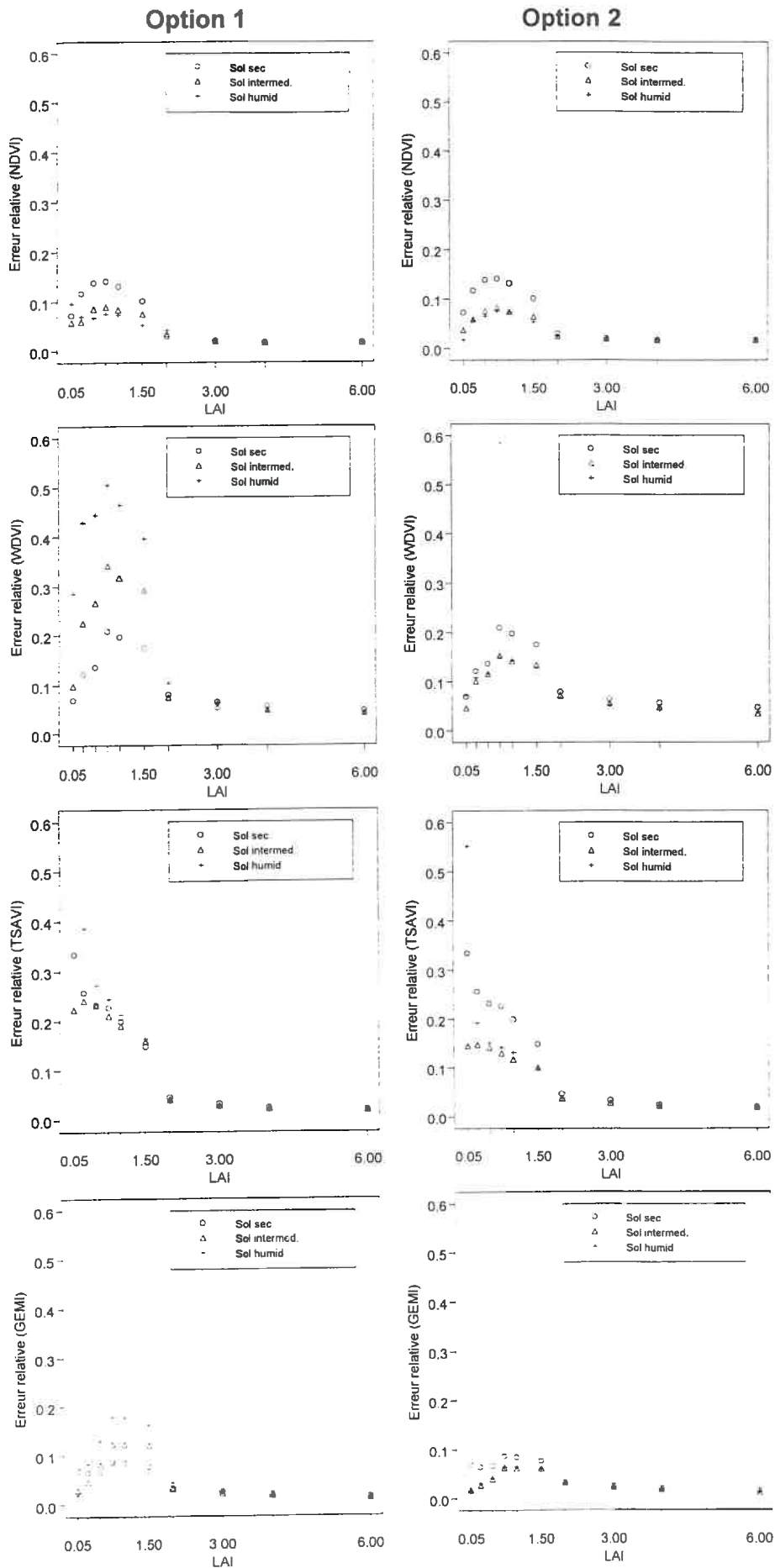


Figure 5-9. Erreurs relatives moyennes sur les indices de végétation (NDVI, WdVI, TSAVI, et GEMI), Sol LM, A) Option 1, B) Option 2.

5.3.3 Mesure des erreurs sur les indices de végétation

De façon similaire à ce qui a été fait sur les réflectances, on a analysé les erreurs produites sur le calcul des 4 indices de végétation lorsqu'on utilise les options 1 ou 2.

Les résultats, en termes d'erreur relative moyenne, sont représentés à Figure 5-9. Rappelons que l'erreur relative moyenne ER_{opti} ne peut pas être comparée entre indices, mais peut être utilisée pour mesurer les différences entre option 1 et 2, pour chaque niveau de LAI.

On retrouve, comme dans le cas des réflectances, le découpage en 2 périodes, avant et après LAI=2, avec des niveaux d'erreur relative nettement plus élevés dans la première période. Les différences du niveau des erreurs entre indices (plus faible pour NDVI que pour TSAVI par exemple) pour cette période est liée à la différences des valeurs prises par ces indices (par construction), pour cette gamme de LAI (plus fortes pour NDVI que pour TSAVI) (Figure 5-10). Le haut niveau de l'erreur sur TSAVI pour de très faibles LAI est due à la très faible valeur de TSAVI pour ces niveaux. Quand LAI tend vers zéro, TSAVI tend vers zéro, et toute erreur normalisée par division par la valeur de TSAVI devient très forte. L'erreur augmente en fonction du LAI pour WdVI et GEMI, reste constante pour NDVI mais décroît pour TSAVI. L'augmentation de l'erreur relative pour WdVI et GEMI est causée par une augmentation plus rapide de l'erreur que de la valeur absolue de l'indice. C'est l'opposé qui se produit pour TSAVI où la valeur de l'indice augmente beaucoup plus vite que le niveau de l'erreur. En fait, dans l'analyse de ces erreurs relatives on doit incorporer la pente de la courbe de réponse de l'indice au LAI (Figure 5-10A): plus elle est forte (cas de TSAVI), plus l'erreur diminue rapidement.

Dans le cas de l'option 1, les erreurs pour cette gamme de faibles LAI sont d'autant plus élevées que les humidités de sol sont éloignées de celle retenue dans l'option 1 (erreur plus forte pour les sols humides). Une diminution nette de l'erreur relative moyenne, liée à la diminution de l'erreur absolue est observée avec l'option 2 pour les faibles LAI (inférieurs à 1.5), là où une meilleure description de la réflectance du sol est proposée par l'option 2. Bien qu'on puisse difficilement comparer les erreurs relatives entre indices ou les réductions d'erreurs entre les options 1 et 2, il semble que cela est observé pour tous les indices, même ceux qui étaient réputés prendre en compte l'effet du sol (TSAVI). Cependant, cette supériorité de l'option 2 apparaît plus faible que dans le cas des réflectances: le calcul d'indice permet d'éliminer une partie de l'effet d'incertitude autour des paramètres de SAIL.

Après LAI=2, les erreurs relatives ne diminuent que très légèrement lorsqu'on utilise les paramètres de l'option 2 au lieu de l'option 1. Elles restent très constantes pour toute la gamme de LAI 2.0-6.0. Cela indique que chacun de ces indices est seulement faiblement sensible aux variations des propriétés optiques et à la structure.

Il est intéressant de remarquer qu'aucun des indices ne semble affecté par l'introduction des occurrences de binage et la modification de rugosité associée après LAI=0.75, alors que c'était le cas pour les réflectances.

De façon générale, les niveaux d'erreur relative les plus faibles sont constatés pour NDVI et GEMI comparés à TSAVI and WdVI.

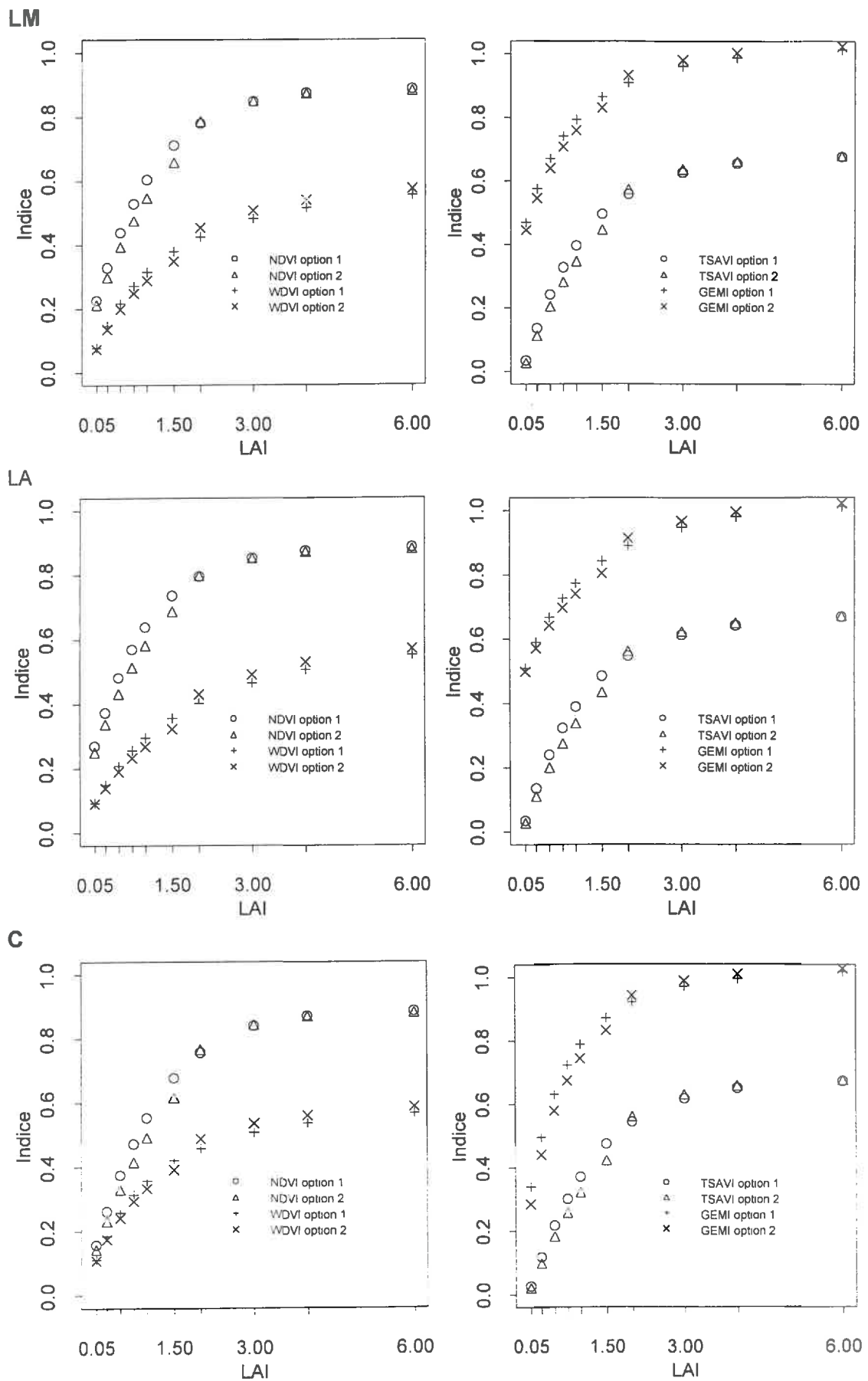


Figure 5-10. Relations indices de végétation-LAI pour les différents indices NDVI, WDWI, TSAVI, et GEMI), différent types de sol sec: LM, LA, et C.

L'influence de l'effet type de sol sur les erreurs associées aux indices de végétation dépend beaucoup du type d'indice. En effet, par construction, les indices sont plus ou moins sensibles à l'effet sol: sur la Figure 5-10, on constate que les valeurs de NDVI et GEMI sont très sensibles au type de sol pour les faibles LAI (NDVI pour un LAI de 0.05 vaut 0.2 sur un LM sec, 0.22 sur un LA sec, et 0.15 sur la craie). Par contre TSAVI et WdVI, construits à partir de la droite des sols, sont très peu sensible au type de sol. En conséquence, les niveaux d'erreur sur GEMI et surtout NDVI sont différents dans le cas des sols LA et C de ceux qu'on observe sur le LM; par contre, pour TSAVI et WdVI, il y a très peu de différence. Dans tous les cas, malgré l'atténuation des effets sol par les indices, l'option 2 donne toujours des erreurs plus faibles que l'option 1.

En bilan de cette analyse, on peut dégager les résultats suivants:

- En conditions "opérationnelles" de mise en oeuvre de la méthode de ré-étalonnage du modèle, il existe une grande variabilité des caractéristiques du sol et de l'état du couvert qui sont des paramètres du modèle de réflectance (réflectance du sol, propriétés optiques et angle moyen des feuilles). Une détermination unique de ces paramètres (option 1) pour représenter cette variabilité est très insuffisante et source d'erreurs sur l'estimation des réflectances du couvert.
- Ces erreurs, exprimées en erreurs relatives, sont particulièrement importantes pour les faibles LAI, où l'influence de la réflectance du sol est forte. Cela est valable aussi bien pour les réflectances que pour les indices de végétation. Elles s'atténuent dès que le LAI atteint des valeurs de 2, et plus rapidement pour le rouge que pour la proche infrarouge, pour atteindre un niveau constant.
- Nous avons proposé une méthode d'estimation plus différenciée de ces paramètres, fondée sur une analyse préalable de cette variabilité et la définition de règles (option 2). La comparaison des deux options pour la représentation de la réflectance du couvert montre une réduction significative des erreurs faites lorsqu'on applique l'option pour le calcul des réflectances. Cette forte réduction des erreurs est essentiellement due à la forte réduction des erreurs sur la réflectance du sol, grâce à la connaissance du type de sol, et de son humidité. L'occurrence du binage ne pouvant être connue, l'erreur liée au changement de rugosité sur la réflectance du sol ne peut être réduite pour les gammes de LAI entre 0.75 et 2. Les erreurs liées aux propriétés optiques et à l'angle foliaire moyen sont relativement constantes et assez faibles.
- L'utilisation d'indices permet de prendre en compte une part de la variation due à l'effet sol, et cela de manière différente selon la manière dont est construit l'indice (il y a 2 types de comportement, de type NDVI ou de type TSAVI). De ce fait, l'amélioration apportée par l'option 2 est relativement plus faible, mais elle reste non négligeable.

En tout état de cause, après cette étape d'analyse des erreurs engendrées par le mode d'estimation des paramètres de SAIL, il convient d'en mesurer les répercussions sur le processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé SUCROS+SAIL. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le Chapitre suivant.

Assimilation des données de réflectance

6. Assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé SUCROS + SAIL

Dans ce chapitre nous allons mettre en oeuvre et évaluer la méthode de correction du modèle de culture SUCROS par assimilation de données de réflectance à travers le modèle SAIL, en utilisant le modèle couplé SUCROS+SAIL étalonné pour les conditions de culture de la région.

A l'échelle des bassins d'alimentation de sucreries, pour lesquels on veut prédire le rendement, la variabilité des situations culturales s'exprime par des différences dans les dynamiques de mise en place des peuplements. On considère que dans des conditions assurant une croissance potentielle, ce sont essentiellement les conditions de réalisation de la phase d'implantation qui vont être à l'origine de la variabilité. Des mesures de télédétection acquises sur l'ensemble des parcelles pendant cette phase, permettent d'utiliser les différences de réflectances qui résultent de ces différences de dynamiques d'installation du couvert, pour "recaler" le modèle pour chaque parcelle. Ce recalage ou correction se fait par ré-initialisation des conditions de démarrage du modèle (estimation du "paramètre" date de semis) et re-étalonnage (re-estimation des paramètres) du module semis-levée et croissance juvénile.

Nous nous proposons ici d'évaluer cette méthode de correction du modèle par assimilation de données de réflectance, en nous intéressant à différents aspects de la qualité de cette correction. Dans les travaux relatifs à ce type de méthode (Maas, 1988; Bouman; 1991; Fischer *et al.*, 1994; Van Leeuwen, 1996; Moulin, 1995), seule la précision d'estimation du rendement final est considérée. Or, cette méthode, qui est fondée sur l'inversion des modèles mécanistes de fonctionnement de la culture et de réflectance, pourrait être utilisée pour estimer les caractéristiques locales des paramètres du modèle, et donc, indirectement, les caractéristiques du milieu ou de l'interaction milieu x techniques culturales. Elle doit pouvoir être jugée également vis à vis de la précision d'estimation des paramètres et il est important de s'assurer de cet aspect de la qualité

- Nous examinerons donc, dans un premier temps les problèmes posés, de façon générale, par l'estimation de ces paramètres, en liaison avec la manière dont ces paramètres interviennent dans la formalisation de la dynamique du LAI dans le module semis-levée et croissance juvénile.
- Nous mettrons en oeuvre et évaluerons, dans un deuxième temps, la méthode sur la situation test créée dans cet objectif en 1994.
- Nous élargirons dans un troisième temps l'évaluation de la méthode, en la mettant en oeuvre sur un plus grand nombre de situations, créées par simulation. Nous chercherons en particulier à analyser l'effet des erreurs sur l'estimation de la réflectance qui sont liées à la variabilité spatio-temporelle des paramètres de SAIL que nous venons d'étudier au Chapitre 5.

6.1 Estimation des paramètres de la phase d'implantation

6.1.1 Position du problème et méthodologie

Les paramètres descriptifs de l'implantation (somme de température nécessaire à la levée, nombre plantes levées, surface foliaire initiale par plante et dans une moindre mesure vitesse relative de croissance en surface des feuilles) sont déterminés par les conditions de réalisation de la phase semis-levée et ils ne sont pas indépendants (cf. Chapitre 2).

Dans le modèle SUCROS, ils interviennent dans la modélisation de la levée et de la croissance juvénile par une formalisation de type exponentiel (cf. Chapitre 2 et 4). Lorsqu'on cherche à les estimer à partir de mesures (de LAI, mais aussi, indirectement, de télédétection), par inversion de ce modèle, plusieurs facteurs interviennent qui influencent les résultats de l'estimation:

- la formalisation elle-même (nombre de paramètres, forme de la relation entre paramètres, variable de forçage et variable à expliquer), qui peut créer des corrélations entre paramètres -d'une autre nature que les corrélations naturelles évoquée plus haut;
- le nombre et la distribution des mesures, et les erreurs qui peuvent y être associées.

6.1.1.1 Formalisation du problème, nombre de paramètres à estimer

Quand le nombre des mesures est limité, le nombre des paramètres qu'il est possible d'ajuster est également limité. Or la détermination du nombre de paramètres utilisés dans un modèle ne tient pas forcément compte de cet aspect: les paramètres qui y figurent sont là pour refléter la connaissance que l'on a des processus, mais ils ne sont pas toujours indispensables.

Comme nous aurons à faire face à ce problème dans notre application (les observations acquises par télédétection sont généralement peu nombreuses), nous avons essayé de réduire le nombre de paramètres à estimer, soit dans la formalisation, soit dans la sélection des paramètres à estimer.

Le modèle étant initialisé par une date de semis, la croissance précoce du LAI est décrite dans SUCROS grâce à 3 paramètres par l'équation 4-1 (Chapitre 4), que nous reprenons ici:

$$LAI = (LA0 \cdot NPL) \cdot \exp^{RGRL \cdot TSUMEM} \quad \text{Eq. 6-1}$$

avec:

$LA0$ = la surface foliaire moyenne par plante de la jour de la levée

NPL = la densité des plantes de la jour de la levée,

$RGRL$ = le taux de croissance relative des feuilles,

$TSUMEM$ = somme de température (base 3°C) depuis la levée, et

si l'on considère que la somme de température depuis la levée peut s'écrire à partir de somme de température (base 3°C) depuis le semis et de la somme de températures nécessaire à la levée ($SEMERG$):

$$TSUMEM = ST - SEMERG \quad \text{Eq. 6-2}$$

où ST est la variable somme de température (base 3°C) depuis le semis,

alors l'Eq. 6-1 s'écrit :

$$LAI = (LA0 \cdot NPL) \cdot \exp^{RGRL \cdot (ST - SEMERG)}$$

Eq. 6-3

On a donc une équation à 4 paramètres $LA0$, NPL , $RGRL$, $SEMERG$ et où la variable de forçage est ST , la somme de température (base 3°C) depuis le semis.

On peut réduire ce nombre de paramètres en considérant que :

1. On ne s'intéresse pas à l'estimation indépendante de NPL et $LA0$ dont on se doute qu'une infinité de combinaisons peuvent être solutions: l'estimation de leur produit ($NPL \times LA0$), qui correspond au LAI initial de la culture, $LAII$, nous suffit pour corriger le modèle.
2. Nous avons vu (Chapitre 2) que dans des conditions de croissance normales, le paramètre $RGRL$ ne varie pratiquement pas après l'apparition des premières feuilles même pour des types d'implantations très différents, et que "l'histoire" des différences entre situations pendant la croissance sous terre pouvait s'exprimer par des $LA0$ (donc aussi des $LAII$) différents. Nous considérerons donc le $RGRL$ comme constant. On peut donc réduire le nombre de paramètres de l'équation à 3 dont 2 sont à estimer:

$$LAI = (LAII) \cdot \exp^{RGRL \cdot (ST - SEMERG)}$$

Eq. 6-4

Le nombre total de paramètres à estimer peut varier suivant les situations où l'on applique le modèle.

- Dans une situation expérimentale, le paramètre $SEMERG$ peut être mesuré directement à partir des comptages de nombre de plantes levées, comme nous l'avons fait sur les 2 situations expérimentales de 1994 à Mons. Dans ce cas, seul le $LAII$ est inconnu. On a un seul paramètre à estimer par ajustement à partir des mesures de croissance du LAI .
- Hors d'une situation expérimentale, et particulièrement dans le cas d'application sur de grands domaines d'espace, il est raisonnable de considérer que le jour de la levée n'est pas connu. On peut envisager que le jour de semis le soit (après enquête auprès des agriculteurs): dans ce cas, seuls $SEMERG$ et $LAII$ sont à estimer. Mais il est plus probable que le jour de semis ne soit pas connu, et un troisième "paramètre" (en fait une des données d'initialisation du modèle), $DAYSOW$ est alors à estimer.

6.1.1.2 L'estimation des paramètres

Elle se fait par inversion du modèle sur des données de LAI mesuré. Nous avons utilisé les mesures réalisées en 94 pour le suivi de la croissance juvénile ($LAI < 0.75$) sur les deux situations d'étalonnage et de test (cf. Chapitre 3). Chacune de ces situations correspond à des paramètres d'implantation différents (implantation et croissance juvénile plus rapide pour la culture d'étalonnage). Chacune des deux situations présente le même nombre de dates de mesure (7), mais ces dates ont une distribution

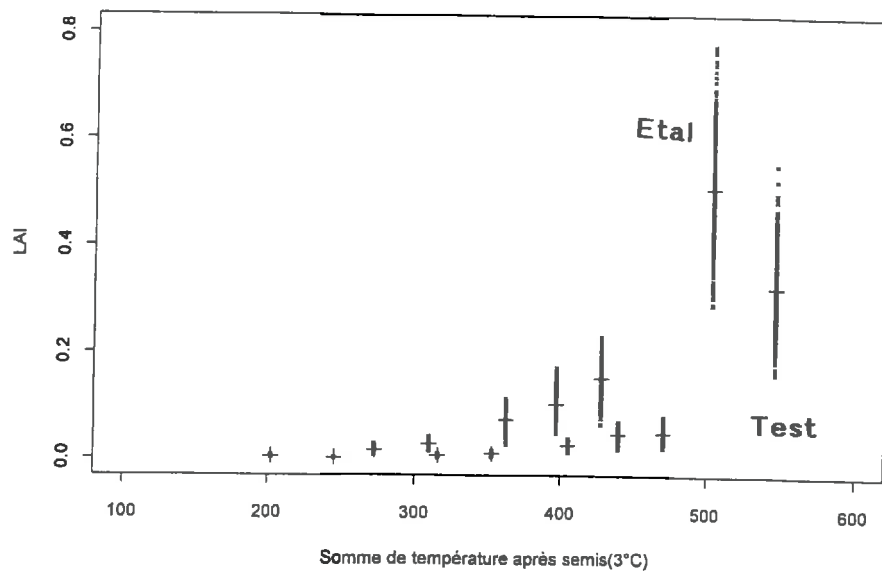


Figure 6-1. Distributions de données bruitées créées autour des mesures pour les deux cultures étalonnage et test. Les mesures sont représentées par les lignes horizontales.

différente vis à vis du stade de croissance (voir Figure 6-1), avec des précisions de mesures variables*, ce qui pourra l'estimation des paramètres.

**La perturbation des conditions de levée de la culture test a conduit non seulement à des valeurs différentes des paramètres d'implantation mais aussi à une hétérogénéité spatiale plus grande pour la culture test; le taux d'échantillonnage appliqué pour les mesures de LAI étant le même que pour la culture d'étalonnage, la précision des mesures est moins bonne: le coefficient de variation sur la mesure de LAI est de l'ordre de 10 à 15% pour la culture d'étalonnage, il est de l'ordre de 25 à 30% pour la culture test.*

6.1.1.2.1 La méthode

La méthode utilisée est une méthode classique de recherche de paramètre par minimisation d'un critère: l'erreur moyenne de prédiction entre valeurs mesurées et valeurs simulées par le modèle (en anglais, RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LAI_{sim_i} - LAI_{mes_i})^2}$$

Eq. 6-5

où n est le nombre de mesures.

Pour mieux comprendre les solutions proposées par l'algorithme de minimisation du critère RMSE, leur qualité d'unicité ou de non-unicité et les éventuelles relations entre paramètres, nous avons analysé au préalable la forme du paysage constitué par la réponse du critère à la variation des valeurs des paramètres dans l'espace multidimensionnel borné par les valeurs admissibles des paramètres. Ces visualisations ne sont possibles qu'en 3 dimensions, donc pour 2 paramètres à la fois (ce qui constitue des surfaces de réponse). Dans le cas de l'estimation de 3 paramètres, nous examinerons les surfaces de réponse aux paramètres considérés 2 à 2. Ceci sera fait pour les deux situations (étalonnage et test). Les valeurs de LAI seront estimées en chaque point d'une grille de valeurs de SEMERG et LAII, et le critère RMSE sera calculé par référence aux valeurs de LAI mesurées dans chacune des 2 situations.

L'algorithme de recherche utilisé pour trouver les valeurs des paramètres qui minimisent le critère est celui du SIMPLEX (Nelder et Mead, 1965). Nous avons utilisé l'intégration de cet outil avec le modèle SUCROS qui a été réalisée dans le programme FSEOPT par l'équipe de AB-DLO à Wageningen (Fortran Simulation Environment OPTimisation, Stol *et al.*, 1992).

Le SIMPLEX est une méthode d'optimisation multidimensionnelle très robuste (cf. Chapitre 2). Elle démarre, dans un espace à N dimensions, à partir d'un simplexe ($N+1$ points): par une séquence de transformations géométriques (réflexion, contraction, extension), le simplexe initial se modifie de façon à s'adapter à la forme du paysage constitué par le critère dans l'espace à N dimensions, et entoure finalement l'optimum. Après chaque transformation, le point donnant les moins bons résultats est remplacé par celui donnant les meilleurs, et ainsi, au fur et à mesure des itérations, le processus converge. Il est stoppé lorsque la différence entre les résultats du meilleur point et du pire est inférieure à un seuil fixé.

Un aspect important dans le fonctionnement du SIMPLEX est la définition du domaine de variation des paramètres: il est important de borner les paramètres dans une gamme de valeurs biologiquement plausible (Bouman, 1991). Nos premiers essais de cette méthode nous ont montré la sensibilité des solutions trouvées (valeurs des paramètres) à la définition de la gamme possible. Nous avons choisi de fixer les gammes des paramètres de façon indépendante, par les valeurs minimum et maximum estimées par Brochery (1996) à partir des résultats obtenus par l'équipe Implantation de l'INRA de Laon. Elles sont présentées dans le Tableau 6-1.

Par ailleurs, pour que les différents paramètres (*SEMERG* et *LAI*) aient des poids équivalents dans la progression du SIMPLEX, nous avons rendu leurs ordres de grandeurs équivalents, en écrivant:

$$SEMERG = SEMERG \times 10^2$$

$$LAI = LAI \times 10^{-3}$$

Ce sont en fait les valeurs de *SEMERG* et *LAI* qui ont été estimées.

Tableau 6-1. Bornes des gammes autorisées pour les paramètres d'implantation à ré-étalonner.

Paramètres d'implantation	Unités	Minimum	Maximum
<i>LAI</i>	ha(feuille).ha(sol) ⁻¹	2.0×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻³
<i>SEMERG</i>	°C jour (base 3°C)	170.0	70.0
<i>DAYSOW</i> [†]	jour	-15.0	+15.0

[†] On considère que l'on peut donner une fourchette de ± 15 jours autour de la date probable (ou réelle dans le cas de données simulées (cf. plus loin)

6.1.1.2.2 Sensibilité de l'estimation des paramètres aux erreurs de mesures

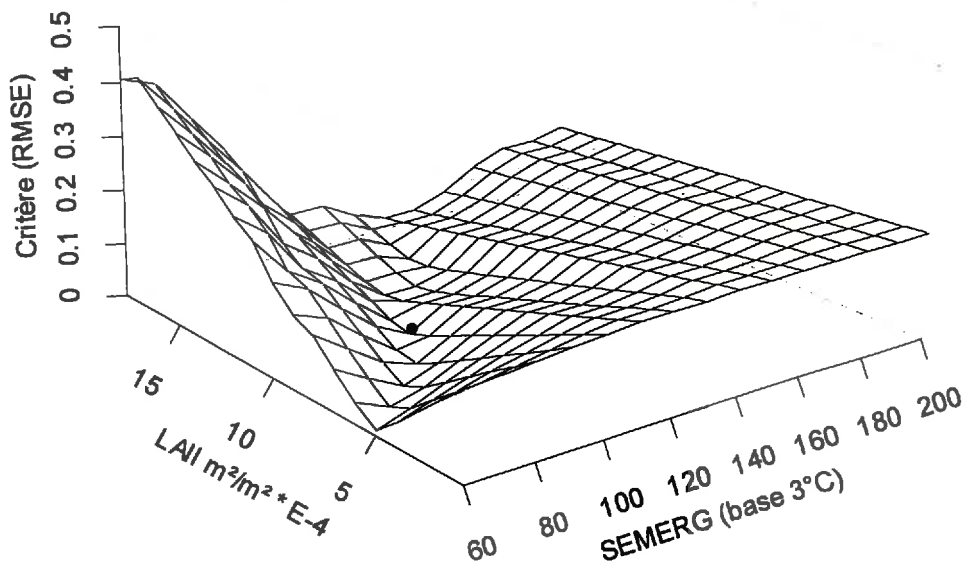
Pour analyser la stabilité des solutions, nous avons créé une distribution de valeurs autour des valeurs mesurées, en ajoutant un bruit aléatoire avec un coefficient de variation de 0.1 correspondant à la précision d'échantillonnage des mesures expérimentales réalisées. Cinq cents séries de LAI "bruités" ont ainsi été créées (Figure 6-1) qui permettent de réaliser 500 inversions du modèle et d'obtenir 500 solutions.

La sensibilité de l'inversion du modèle sera analysée au travers de deux types de critères:

- la distribution et la moyenne des écarts entre les valeurs estimées des paramètres la solution vraie. Cette solution vraie, dans ce cas expérimental consiste en mesures pour ce qui concerne *DAYSOW* et *SEMERG*, en estimation (modèle à un seul paramètre) pour *LAI*.
- la qualité de restitution de la croissance du LAI: nous regarderons la distribution des erreurs moyennes relatives d'estimation (ou RRMSE) entre le LAI bruité et le LAI donné par les paramètres estimés.

$$RRMSE = \frac{1}{LAI_{moy}} \sqrt{\frac{1}{7} \sum_1^5 (LAI_{vrai} - LAI_{sim})^2}$$

A



B

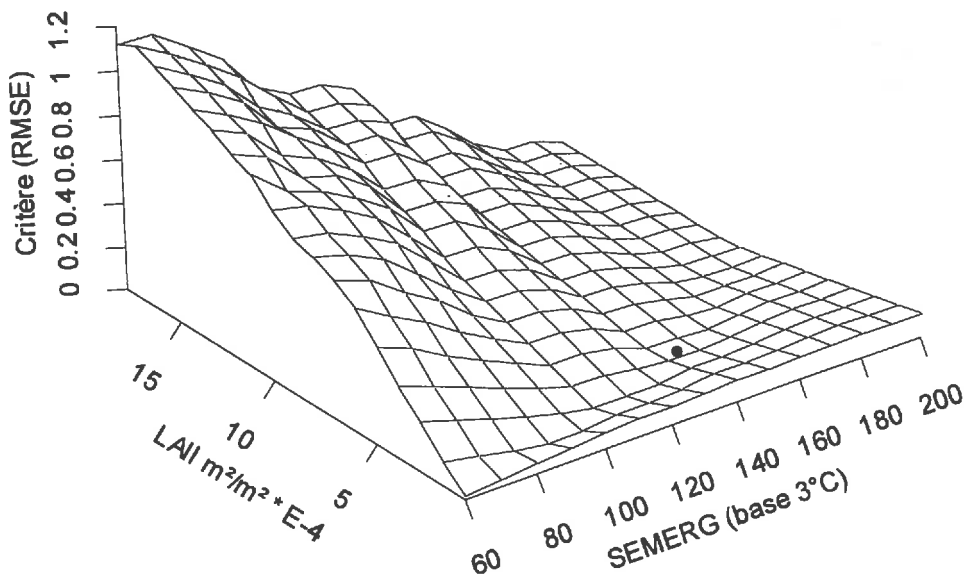


Figure 6-2. Surfaces de réponse du critère RMSE à la variation des paramètres *SEMERG* et *LAI* pour les 2 cultures. Cas de 2 paramètres à estimer. A) étalonnage et B) test. Les points indiquent les valeurs "vraies" des deux paramètres (cf. Tableau 6-2).

avec

$$LAI_{moy} = \frac{1}{7} \sum_1^7 LAI_{vrai}$$

Eq. 6-7

L'estimation de paramètres sera conduite dans trois situations:

- la situation expérimentale, qui fournit les valeurs vraies des paramètres: *DAYSO*W et *SEMERG* sont connus, seul *LAI* est à déterminer;
- la situation où la date des semis est connue, seuls *SEMERG* et *LAI* sont à déterminer; et
- la situation où la date de semis n'est pas connue, elle est à estimer également.

6.1.2 Résultats

6.1.2.1 La solution vraie: cas d'un paramètre (situation expérimentale)

Dans les deux situations expérimentales (étalonnage et test), la date de semis (*DAYSO*W), le taux de levée (*NPL*), et la somme de température nécessaire à la levée (80% du nombre final de plantes levées), *SEMERG* ont été mesurés (Tableau 6-2). Seul *LA0* a été estimé pour les deux cultures, à partir des mesures non bruitées, en utilisant l'outil d'inversion de SUCROS, FSEOPT. Les valeurs de *LA0* estimé sont présentées dans le Tableau 6-2, ainsi que les valeurs de *LAI* recalculées par le produit $NPL \times LA0$. Nous constatons que le *LA0* (et le *LAI*) de la culture d'étalonnage sont supérieurs à ceux de la culture test, et que le RMSE est inférieur, même si le *LAI* de la culture étalonnage est plus important que celui de la culture test. Le RMSE plus important obtenu sur la culture test est dû à l'hétérogénéité de la levée et de l'implantation de cette culture, et la moins grande précision de l'échantillonnage adopté pour les mesures.

Tableau 6-2. Estimation de *LAI* (à partir de *LA0* et *NPL*) dans les situations expérimentales pour les cultures d'étalonnage et de test, et erreur moyenne relative d'estimation (RRMSE) du *LAI* précoce.

Paramètre → Culture ↓	Connu <i>DAYSO</i> W (jour)	Mesuré <i>SEMERG</i> (°C·jour)	Mesuré <i>NPL</i>	Estimé <i>LA0</i> cm ² ·plante ⁻¹	Estimé <i>LAI</i> m ² ·m ⁻²	RRMSE (<i>LAI</i>)
Étalonnage	108.	102.45	10.6	9.717E-5	0.00103	0.0725
Test	108.	145.55	6.7	6.567E-5	0.00044	0.0651

6.1.2.2 Cas de deux paramètres

Le jour de semis *DAYSO*W est connu. On estime *LAI* et *SEMERG*.

• Les surfaces de réponse du critère RMSE

La Figure 6-2 présente les surfaces de réponse du critère en fonction de la variation des 2 paramètres pour les 2 cultures étalonnage (A) et test (B). La largeur de la gamme en ce qui concerne *LAI* a été réduite car le critère prend des valeurs très élevées pour toute valeur de *LAI* supérieure à 2×10^3 . Les

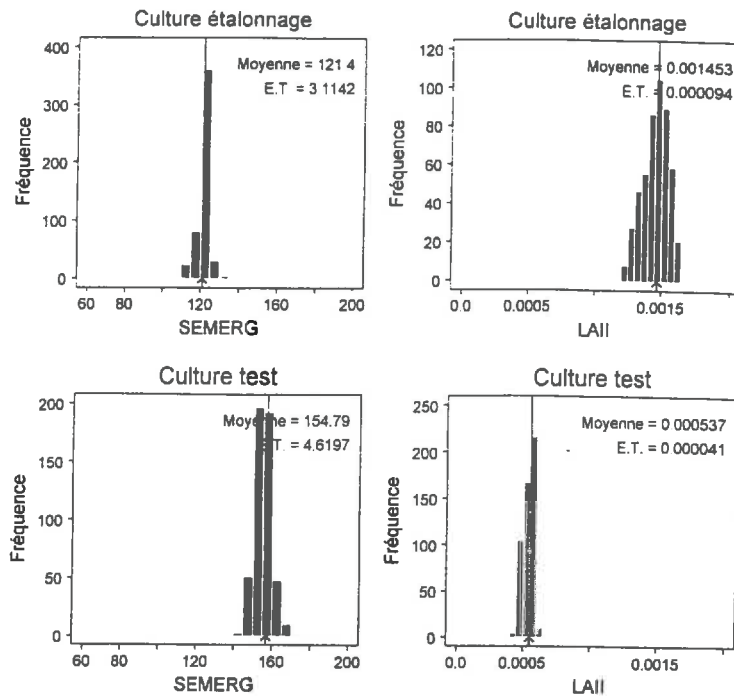


Figure 6-3. Distribution des valeurs des paramètres pour les 500 inversions sur les données de LAI bruitées. Cas de 2 paramètres à estimer. A) culture étalonnage B) culture test. Les \uparrow indiquent les valeurs "vraies" des paramètres, les $|$ indiquent les valeurs moyennes.

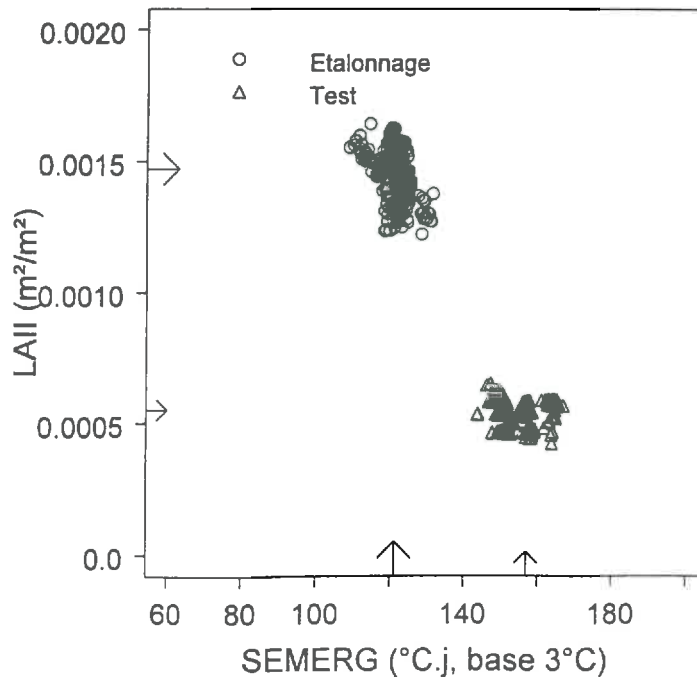


Figure 6-4. Relations entre paramètres estimés dans les 2 situations étalonnage et test. Cas de 2 paramètres à estimer.

surfaces ne sont pas lisses à cause du pas de temps journalier de SUCROS qui conduit à des variations discrètes de *SEMERG*. Les surfaces ne sont bien sûr pas identiques pour les deux cultures: les zones de minima ne sont pas localisées aux mêmes endroits de l'espace, ce qui conduira à des solutions différentes. Mais la forme de ces surfaces est également différente: il apparaît que la forme de la dynamique de croissance, et l'échantillonnage des données mesurées (précision, position par rapport aux états de LAI) ont un effet sur ces différences. Alors que la région des minima forme une vallée assez étroite dans le cas A, elle forme plutôt un delta assez large dans le cas B. Dans les 2 cas, et de façon accrue pour le cas A, la zone des minima couvre des gammes étendues des paramètres : plusieurs combinaisons des 2 paramètres donneront une même valeur du critère. Dans le cas A, la direction de la vallée montre que si on s'écarte de la solution vraie par une augmentation de *SEMERG*, alors *LAI* augmente aussi. Cette tendance est logique parce que un *SEMERG* important va produire des LAI plus faibles à une date donnée, et *LAI* doit être aussi important pour que la courbe de croissance simulée ne soit pas en dessous des mesures. Cette corrélation est liée à la forme de l'Eq. 6-4: une augmentation de *SEMERG* a un effet équivalent à une diminution de *LAI*. Les solutions ne sont pas uniques et on peut imaginer qu'une faible perturbation des données mesurées pourra conduire à des solutions différentes.

● Les distribution des paramètres et de l'erreur moyenne relative d'estimation (RRMSE)

Les résultats de l'estimation des deux paramètres par les 500 inversions sont présentés à la Figure 6-3.

Les distributions des paramètres sont relativement normales: l'algorithme de recherche n'a pas été stoppé par l'atteinte des bornes de l'espace qui ont été fixées.

On constate que les valeurs estimées pour *SEMERG* et *LAI* ne sont pas bien centrées autour des valeurs vraies.

Il apparaît donc que la création d'un bruit aléatoire autour des données mesurées a entraîné un biais au niveau de l'estimation des paramètres. Pour *SEMERG*, l'erreur moyenne est de 19°C.j (soit 19%) pour la culture d'étalonnage et 9°C.j (soit 7%) pour la culture test; pour *LAI*, l'erreur est de 40% pour la culture d'étalonnage et de 22% pour la culture test. Les variabilités de *LAI* et de *SEMERG* sont inversées pour les deux cultures: *LAI* est plus variable que *SEMERG* pour la culture d'étalonnage, c'est l'inverse pour la culture test.

La Figure 6-4 montre les relations entre paramètres estimés: on constate des corrélations négatives entre *SEMERG* et *LAI*, correspondant au fait que *SEMERG* et *LAI* ont des rôles opposés dans la courbe de croissance du LAI: une même variation dans la mesure (ex: augmentation de LAI) peut être expliquée par des variations opposées des 2 paramètres. La pente de la relation est plus forte pour la situation d'étalonnage que pour celle de test. Là encore, comme pour les surfaces de réponse et les

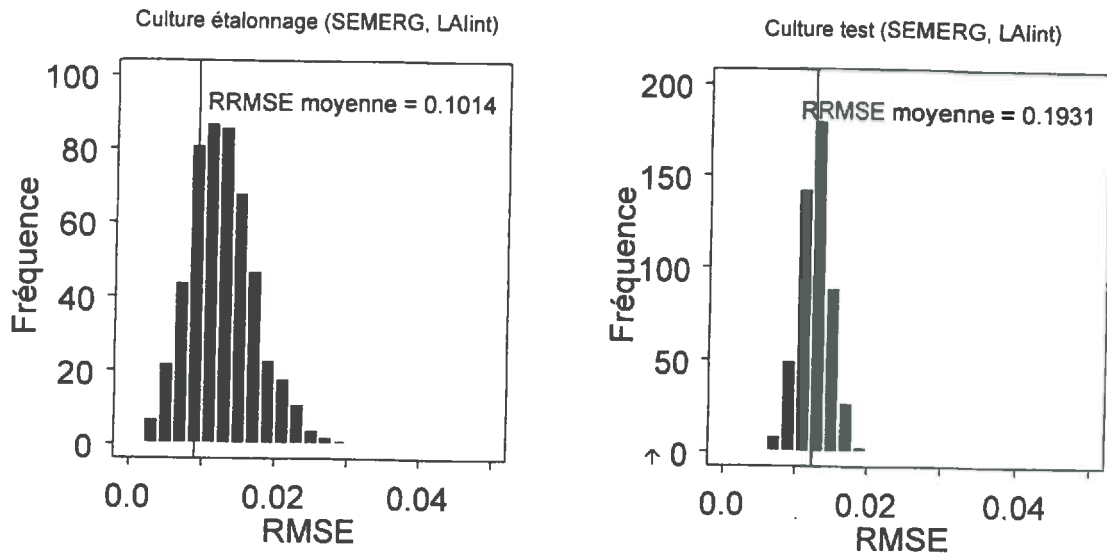


Figure 6-5. Distribution des erreurs moyennes (RMSE) sur le LAI pour les 2 situations étalonnage et test. L'erreur moyenne relative est figurée pour chaque situation. Cas de 2 paramètres à estimer. La flèche (\uparrow) indique le RMSE résiduel calculé dans le cas de l'estimation d'un seul paramètre (cf. Tableau 6-2)

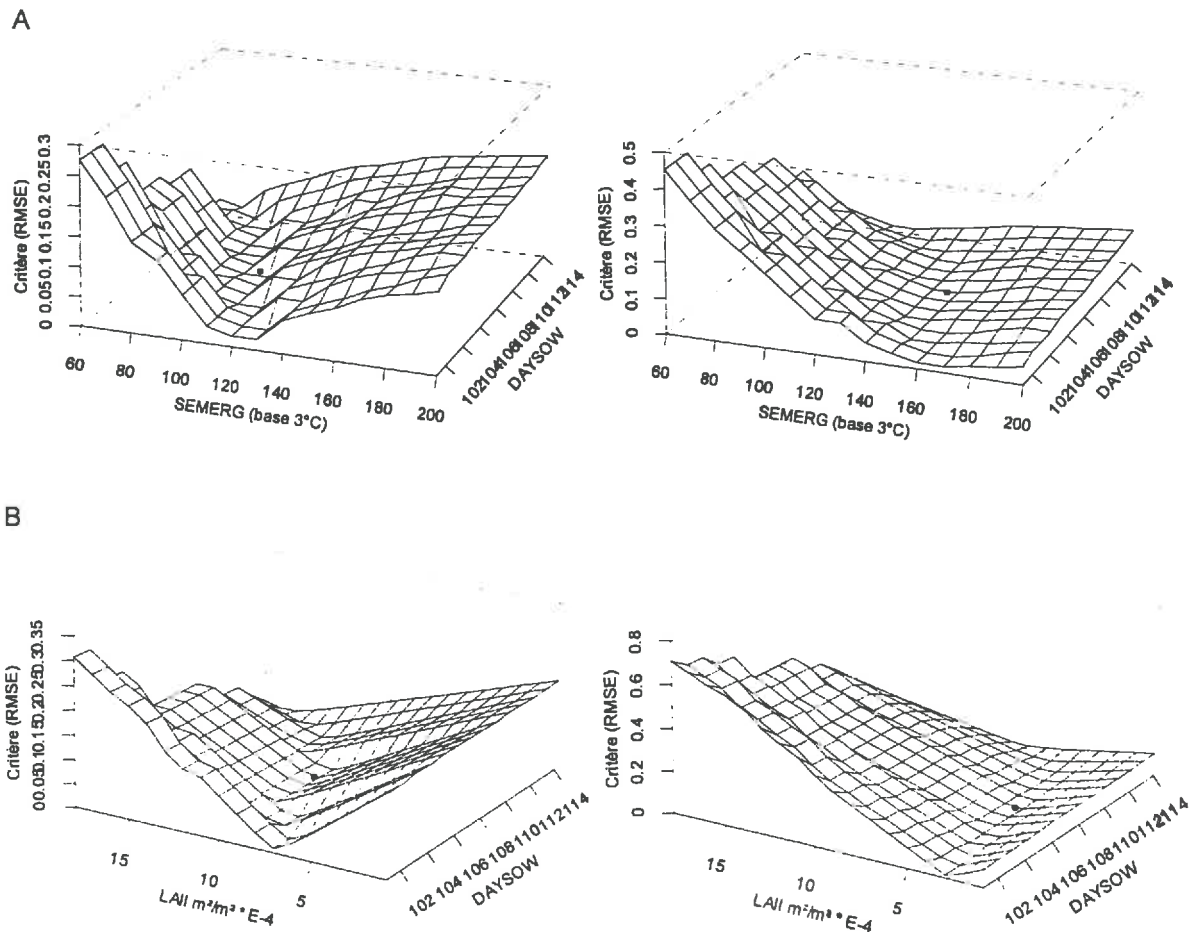


Figure 6-6. Surfaces de réponse du critère RMSE à la variation des paramètres *DAYSOW*, *SEMERG*, *LAI* pour les 2 cultures. Cas de 3 paramètres à estimer. A) étalonnage et B) test. Les points indiquent les valeurs "vraies" des deux paramètres (cf. Tableau 6-2).

valeurs des paramètres, on constate que les différences entre situations expérimentales ont créé des différences dans la qualité de restitution des valeurs des paramètres.

Les distributions des valeurs finales de l'erreur relative moyenne d'ajustement (RRMSE sur les LAI) sont présentées à la Figure 6-5. On constate que ces erreurs relatives sont plus faibles dans le cas de la culture d'étalonnage (0.10) que pour la culture test (0.19). Elles sont bien centrées sur la valeur représentative du RRMSE obtenu avec un seul paramètre à estimer dans le cas de la culture test; la distribution est plus dissymétrique dans le cas de la culture d'étalonnage.

En bilan, il apparaît que l'introduction d'un bruit de l'ordre de 10% sur les valeurs de LAI mesurés entraîne une dispersion et un biais dans l'estimation des paramètres, mais permet une bonne restitution des LAI.

6.1.2.3 Cas de trois paramètres

● Les surfaces de réponse du critère RMSE

Avec l'ajout du "paramètre" (ou date d'initialisation) *DAYSO*, on a examiné les 2 nouvelles surfaces de réponse du critère RMSE: (*DAYSO*, *LAI*) et (*DAYSO*, *SEMERG*). Pour chacune de ces surfaces, le calcul a été fait avec les valeurs vraies du 3ème paramètre. Ces surfaces sont présentées à la Figure 6-6.

1. *LAI* et *DAYSO*: Les surfaces de réponse à *LAI* et *DAYSO* ont une forme similaire aux surfaces de réponse à *LAI* et *SEMERG* dans le paragraphe précédent: en effet, une variation du jour de semis a un effet similaire à celui d'une variation de *SEMERG*. Nous avons réduit l'amplitude de variation de *DAYSO* dans cette représentation (par rapport à la gamme annoncée au Tableau 6-1) car le critère montait très haut pour des valeurs de *DAYSO* éloignées de plus de 7 jours avant la date solution.

Une relation positive existe donc aussi entre *LAI* et *DAYSO* pour la culture d'étalonnage pour les mêmes raisons qu'entre *LAI* et *SEMERG*. Cette relation est moins nette pour la culture test où le critère varie peu entre *DAYSO* = 101 à 114 pour les faibles *LAI*. Les surfaces sont encore moins lisses que dans le cas (*SEMERG*, *LAI*): cela est dû à la variation de *DAYSO* qui entraîne des variations discrètes et d'amplitude variable sur la variable de forçage Somme de température.

2. *SEMERG* et *DAYSO*: Là encore, et dans les 2 cas, la zone des minima est étendue: plusieurs combinaisons des 2 paramètres donnent une même valeur du critère. Les valeurs minimales du RMSE sont dans une vallée aux versants abrupts des 2 côtés pour la culture d'étalonnage, alors que la surface est dissymétrique, avec un versant très plat pour la culture test. Les surfaces de réponse de ces paramètres montrent des corrélations négatives. Dans le cas A, la direction de la vallée, montre que si on s'écarte de la solution vraie par une augmentation de *DAYSO*, alors *SEMERG* diminue. Cette tendance est logique parce que un *DAYSO* retardé va produire des LAI

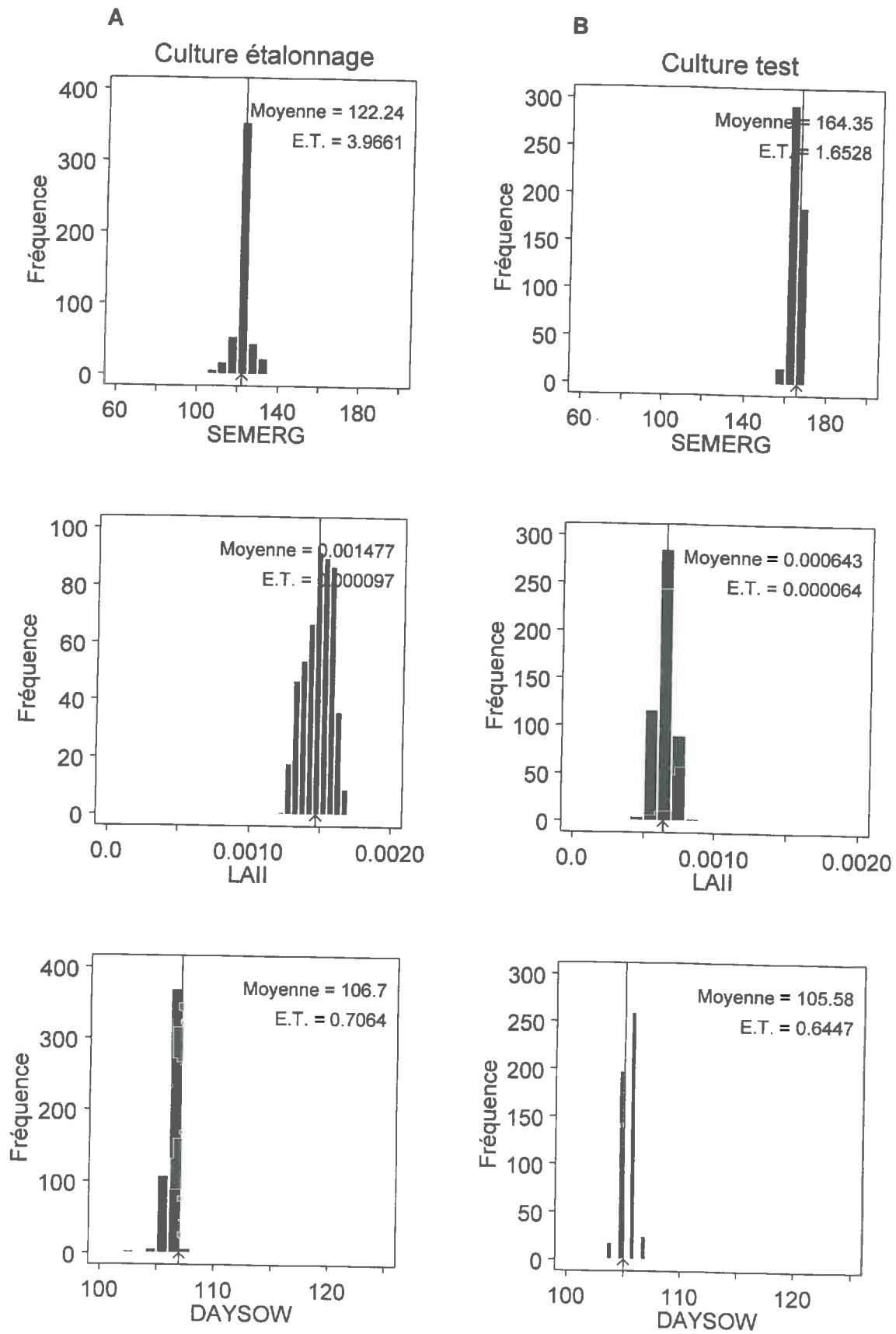


Figure 6-7. Distribution des valeurs des paramètres pour les 500 inversions sur les données de LAI bruitées. Cas de 3 paramètres à estimer. A) culture étalonnage B) culture test. Les \uparrow indiquent les valeurs "vraies" des paramètres.

plus faibles à une date donnée, et *SEMERG* doit alors être plus faible pour que la courbe de croissance simulée ne soit pas en dessous des mesures. Cette corrélation est liée à la forme de l'Eq. 6-4: une augmentation de *DAYSOW* a un effet équivalent à une augmentation de *SEMERG*.

• Les distributions des paramètres et de l'erreur moyenne relative (RRMSE)

Les résultats de l'estimation des trois paramètres sont présentés dans la Figure 6-7 pour les deux cultures. On constate que l'introduction d'un troisième paramètre a peu modifié la qualité des estimations de *SEMERG* et *LAI_{int}*. Ces estimations ont des niveaux d'erreur assez importants, comme dans le cas précédent. Par contre, *DAYSOW* est estimé avec une très bonne précision dans les deux cas (1.3 et 2.4 jours d'erreur moyenne, avec de très faibles écart-types).

Les résultats en terme de RRMSE sur l'estimation des LAI sont très semblables à ceux obtenus dans le cas de 2 paramètres (Figure 6.8) et le fait d'ajouter un autre paramètre à estimer n'a pas diminué la capacité à bien simuler la croissance.

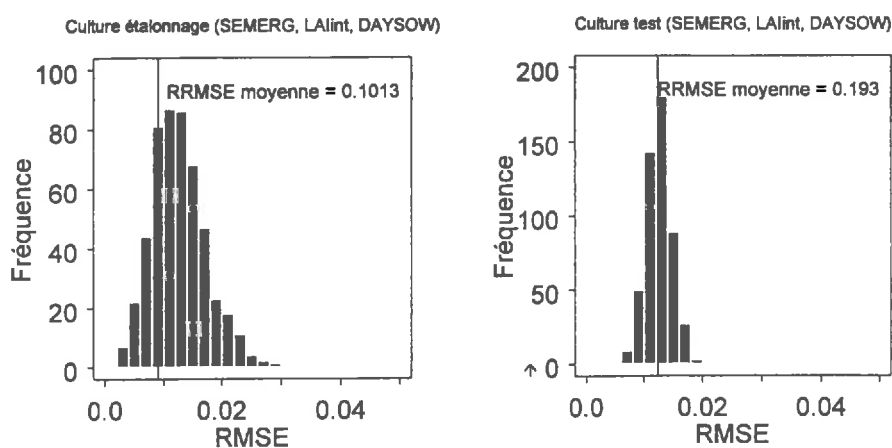


Figure 6-8. Distribution des erreurs moyennes (RMSE) sur le LAI pour les 2 situations étalonnage et test. L'erreur moyenne relative est figurée pour chaque situation. Cas de 3 paramètres à estimer. La flèche (↑) indique le RRMSE résiduel calculé dans le cas de l'estimation d'un seul paramètre (cf. Tableau 6-2).

6.1.2.4 Conclusion

En bilan de cette étude préliminaire, nous pouvons retenir que:

- Les paramètres de la phase d'implantation (au sens large, y compris la date de semis) ont entre eux des corrélations fonctionnelles (liées à la forme du modèle) qui génèrent, lors de leur estimation par inversion du modèle à partir de données de LAI mesurés avec un certain bruit, des solutions variables autour des solutions vraies. La variabilité n'est pas très importante mais le biais n'est pas négligeable.

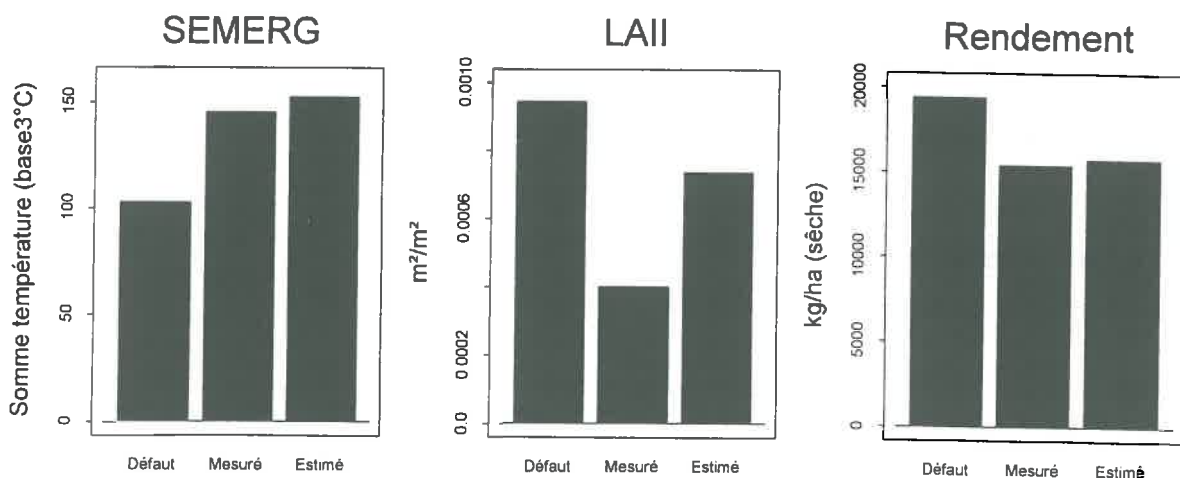
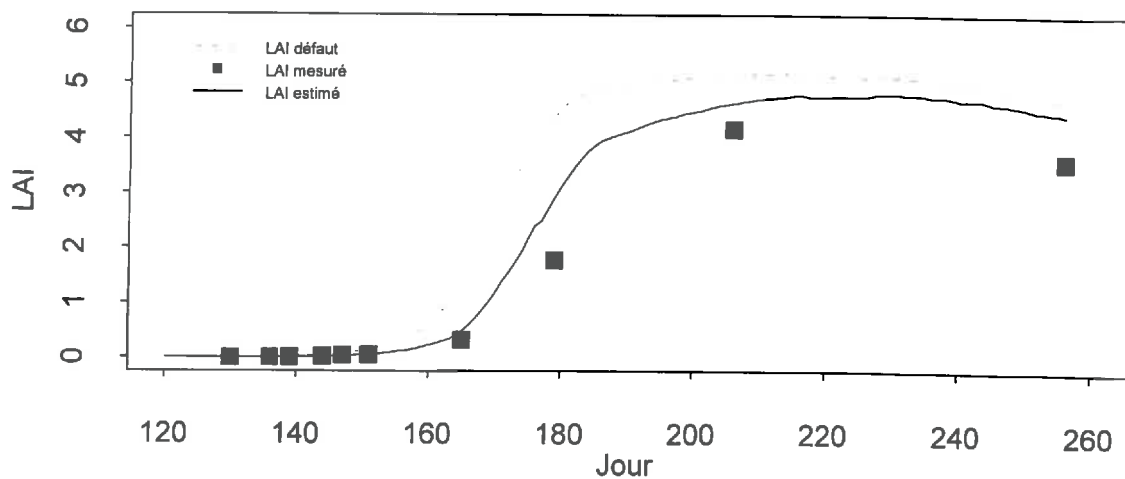
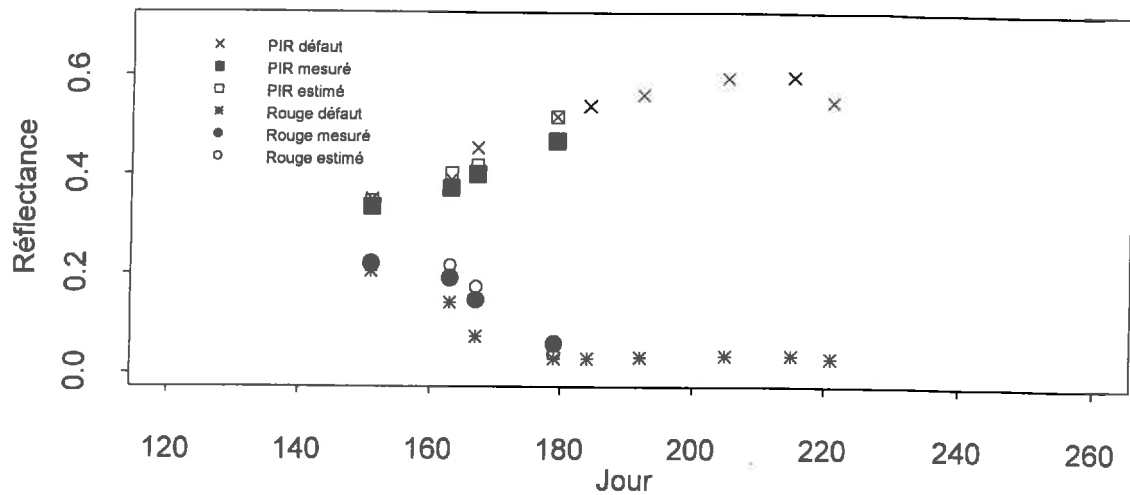


Figure 6-9. Résultats de l'assimilation des réflectances de la culture test sur l'estimation de A) les réflectances (les ■ et ● représentent les mesures utilisées); B) le LAI; C) les paramètres SEMERG et LAII et le rendement (poids sec de racines). On compare les valeurs estimées avant correction (avec les paramètres par défaut), et celles obtenues après correction (avec les paramètres ré-estimés), aux valeurs mesurées.

- Le fait de considérer 1 (*LAI*), 2(*LAI*, *SEMERG*) ou 3 (*LAI*, *SEMERG*, *DAYSOW*) paramètres à estimer, ne modifie pas sensiblement la qualité d'estimation du LAI; par contre dans les cas où 2 ou 3 paramètres sont à estimer, la précision d'estimation des paramètres n'est pas très bonne.

La relativement mauvaise qualité de restitution des deux paramètres *SEMERG* et *LAI*, démontre que l'on peut correctement décrire l'évolution du LAI sans pour autant obtenir de bonnes estimations des paramètres.

- Ces résultats peuvent nous faire craindre pour la suite une relativement faible aptitude de l'inversion du modèle couplé SUCROS + SAIL à restituer des valeurs correctes des paramètres d'implantation. Toutefois, ils ont été obtenus par inversion sur des mesures de LAI où nous avons imposé un niveau de bruit constant, et ils doivent être suivis de la véritable application que représente l'inversion du modèle couplé SUCROS+SAIL sur des données de réflectance mesurée. Dans ce cas, on a vu au Chapitre 5 que le niveau d'erreur associé aux mesures varie selon le stade de LAI. Nous allons montrer dans la suite comment cela se répercute sur les résultats. Nous allons dans un premier temps réaliser l'assimilation des réflectances sur la situation expérimentale-test, puis généraliser ces résultats sur des situations simulées.

6.2 Assimilation de données de réflectances par le modèle couplé: étude sur un cas-test en situation expérimentale

6.2.1 Méthode

Nous avons utilisé la culture test, dont nous avons volontairement perturbé l'implantation (les paramètres sont bien différents de la culture d'étalonnage) pour évaluer les performances de cette assimilation. Dans ce cas, on considère que c'est une situation expérimentale incomplètement contrôlée, où la date de semis est connue. Les deux paramètres *SEMERG* et *LAI* sont ré-estimés pour corriger la simulation donnée par le modèle SUCROS et SAIL étalonnés sur la culture étalonnage. On inverse pour cela le modèle couplé sur les 4 dates de mesures des réflectance (dans les 3 bandes spectrales) faites pendant la phase d'installation du LAI (entre $LA0 = 0$ et $LAI = 3$).

Nous évaluerons les performances de la correction réalisée, vis à vis de la restitution des valeurs vraies des paramètres, du LAI et du rendement.

6.2.2 Résultats:

La Figure 6-9 montre les résultats de l'assimilation des réflectances sur la culture test. Pour évaluer l'intérêt de la méthode, on compare les valeurs estimées avant et après correction avec les valeurs mesurées. Bien qu'elle ne soit pas parfaite, la correction est d'un intérêt évident.

Au niveau des réflectances, la restitution n'est pas parfaite. Peut-être les problèmes évoqués au niveau de la variation du port foliaire en fonction de la densité (cf. Chapitre 4) ont-ils joué. Au niveau du

LAI, on constate la nette amélioration par rapport à la simulation avec les paramètres par défaut: le retard dans la mise en place du couvert est bien pris en compte par la correction.

Les valeurs des paramètres issues de la procédure de ré-étalonnage elles aussi sont plus proches des valeurs mesurées que des valeurs par défaut. Le *SEMERG* estimé est de $148.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ au lieu de $145.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$. Par contre, la restitution du *LAI* est moins bonne (7.5×10^{-4} au lieu de 4.0×10^{-4}), mais toujours dans sens: d'un rapprochement de la valeur "mesurée".

Enfin, la correction a permis également de faire une très bonne estimation de rendement: la légère surestimation du LAI n'a provoqué qu'une faible surestimation du rendement: $15753 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ au lieu de $15417 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que les LAI supérieurs à 3.5 sont peu "efficaces" vis à vis de la production nette de biomasse; par ailleurs, les données de rendements mesurées sont elles aussi assorties d'une erreur qui doit nous conduire à être prudent sur la comparaison stricte des 2 valeurs de rendements.

6.3 Assimilation de données de réflectances par le modèle couplé: étude à l'échelle régionale à partir de situations simulées

La situation expérimentale particulière que nous avons créée nous a permis de tester la faisabilité de la méthode de correction du modèle SUCROS par assimilation de données de télédétection. Cependant, elle ne permet de la valider complètement, en particulier elle ne permet pas d'analyser les effets d'un certain nombre de facteurs qui influencent les résultats de l'assimilation et qui interviennent dans les conditions d'application en grandeur nature: nombre de données de télédétection acquises, position de ces acquisitions par rapport au stade de la culture, effet des erreurs liées à l'estimation de la réflectance....

Les auteurs qui ont travaillé sur ce type d'analyse ont toujours considéré ces facteurs séparément (Bouman, 1991, Moulin, 1995). Or, dans la réalité, sur les domaines d'espace auxquels on s'intéresse, ces facteurs sont associés et leurs effets se cumulent. Il nous a paru plus intéressant de les considérer de cette façon là, et d'analyser leur effet global sur le résultat de l'assimilation. Pour cela, nous avons procédé, comme dans le Chapitre précédant, par simulation, en reconstituant des données qui représentent la diversité des situations existant sur ces domaines d'espace.

Nous avons considéré que l'effet du nombre de mesures de télédétection acquises avait été suffisamment étudié dans la littérature et que le résultat allait toujours dans le sens d'une amélioration de la correction avec l'augmentation du nombre de dates. Nous nous sommes donc concentrés sur deux aspects principaux du problème:

- l'effet des erreurs sur les réflectances simulées, liées à la méconnaissance des paramètres de SAIL.

Il peut y avoir sur les réflectances mesurées des erreurs d'origines diverses (instrumentale, atmosphérique, ...) distribuées de façon aléatoire et qui ont certainement un effet sur les résultats de l'assimilation, mais la question qui nous a paru la plus préoccupante pour une application à

l'échelle régionale, c'est l'impossibilité de connaître précisément les valeurs des paramètres du modèle de réflectance. Selon l'option choisie pour l'estimation de ces paramètres, il existe un écart entre la réflectance simulée et la réflectance mesurée (cf. Chapitre 5), et c'est ce type d'erreur dont nous avons voulu analyser les effets. Il faut souligner que cet aspect est complètement lié au premier, puisque le niveau des erreurs produites par l'utilisation de SAIL sont très dépendantes du niveau de LAI.

- l'effet du positionnement des mesures acquises par rapport à l'état de croissance de la culture (exprimé en terme de LAI) de la culture.

Le positionnement relatif des mesures et de l'état de croissance de la culture intervient, lui, sur la qualité de la correction du modèle SUCROS. Comme on a pu le constater dans la comparaison des situations d'étalonnage et de test lors de l'estimation des paramètres de la croissance précoce à partir de mesures du LAI (cf. 6.1), les niveaux de LAI au moment où les mesures sont disponibles influencent beaucoup le résultat de l'ajustement.

6.3.1 Méthodologie

Pour analyser ces deux effets, on a d'abord créé un ensemble de situations "réelles", par simulation, puis procédé à l'assimilation des données de télédétection par le modèle couplé SUCSAIL.

6.3.1.1 Création de situations réelles

On se place dans une configuration proche de la réalité dans laquelle on sera amené à mettre en oeuvre la méthode d'estimation des rendements. On s'intéresse à la phase d'installation du couvert, qui est réalisée de façon très diverse au niveau de la petite région à cause en particulier de la diversité des dates de semis et de celle des conditions d'implantation: on cherche à re-caler le modèle SUCROS sur chaque situation grâce à une série de mesures de télédétection.

- programmation des acquisitions de mesures:

On programme donc des acquisitions de mesures pendant cette phase d'installation, au nombre de 5, selon un calendrier en accord avec le développement moyen des cultures de betterave dans la région. On a choisi les dates suivantes: 5 Mai (jour 125), 16 Mai (jour 136), 30 Mai (jour 150), 11 Juin (jour 162), et 24 Juin (jour 175).

- simulation des situations réelles:

Les situations simulées sont caractérisées par une date de semis et un type d'implantation. Pour représenter la gamme de variation des situations d'implantation on considère trois dates de semis: 15 Mars, 30 Mars et 15 Avril et on a utilisé les données bibliographiques du Chapitre 2 pour qualifier le type d'implantation: une réussie (type Q1), une moyenne (type Q2), une mauvaise (type Q4). Les

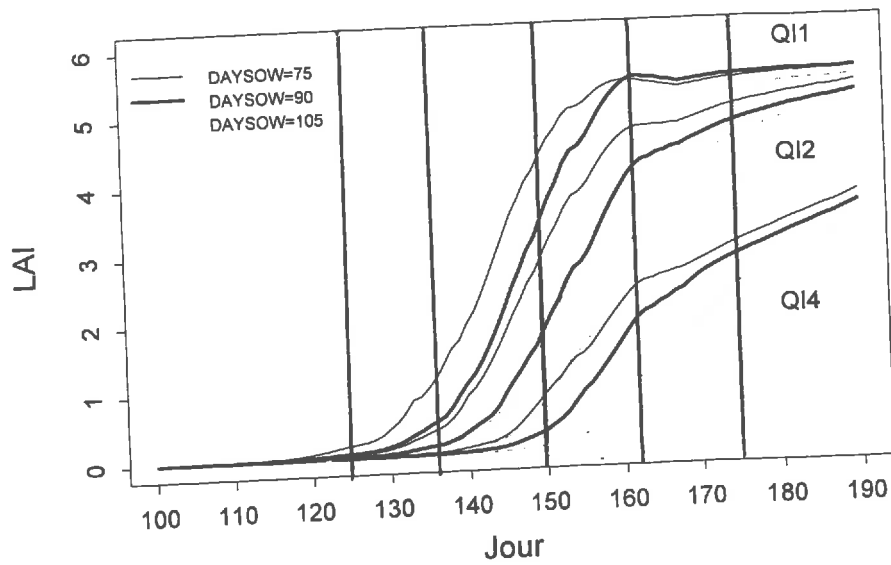


Figure 6-10. Position des courbes d'évolution du LAI des différentes situations d'implantation par rapport aux dates des mesures (représentées par les |).

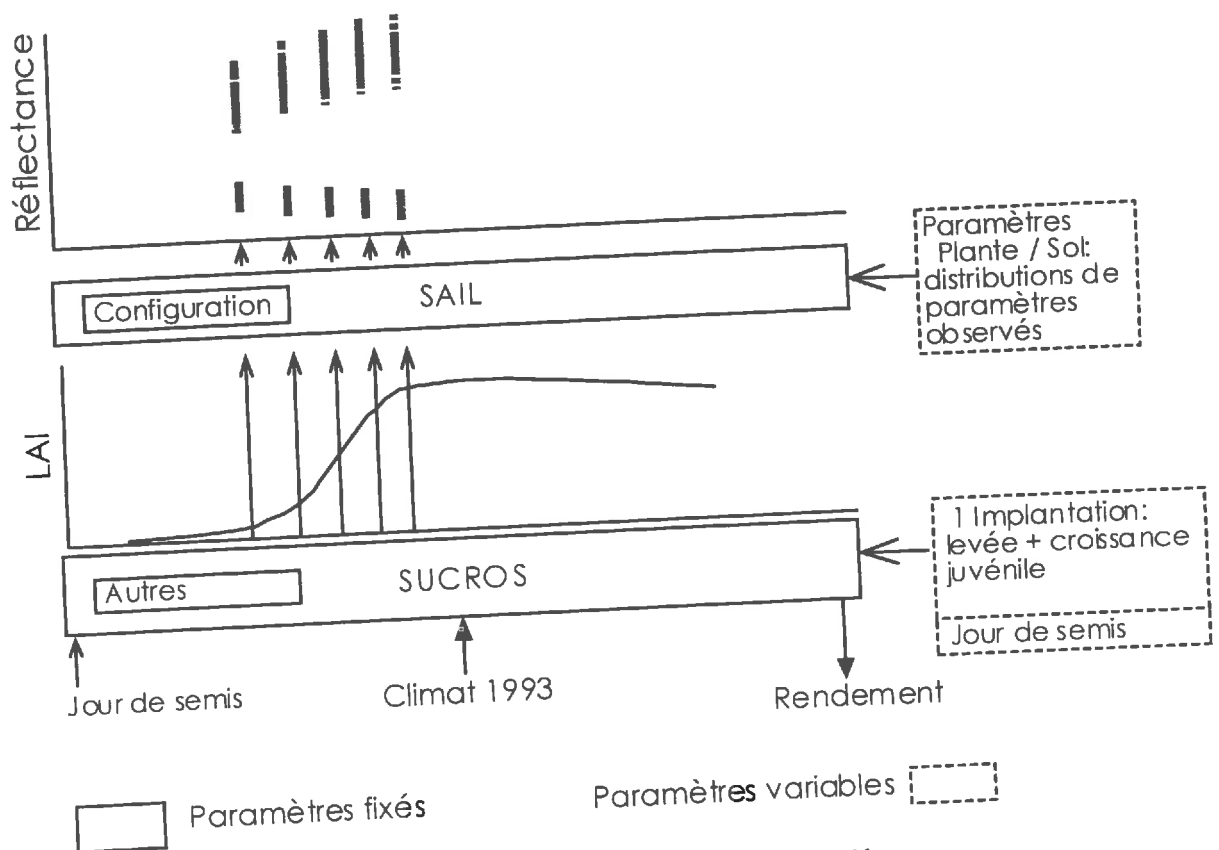


Figure 6-11. Schéma de création des données des situations simulées.

paramètres utilisés pour chacun de ces types d'implantation sont rappelés dans le Tableau 6-3. Pour chacune d'entre elles, le modèle SUCROS donne une description de la croissance, représentée à la Figure 6-10 par l'évolution du LAI. On obtient, par ces différents types d'implantation, des situations très différentes en terme de niveaux de LAI atteints aux différentes dates de mesure.

Tableau 6-3. Paramètres utilisés pour décrire les 3 types d'implantation.

Type d'implantation	<i>NPL</i> plantes·m ²	<i>LA0</i> cm ² ·plante	<i>SEMERG</i> °Cj (80% de taux final, base 3°C)	<i>RGRL</i> ha(feilles)· ha(sol) ⁻¹ ·°C ⁻¹ j ⁻¹	<i>DAYSOw</i> Jour
associé					
QI1 (rapide)	12.0	2.25	75.0	0.0156	90.0
QI2 (moyenne)	9.0	1.51	110.0	0.0156	90.0
QI4 (lente)	6.0	0.49	150.0	0.0156	90.0

- simulation des réflectances de couvert:

Pour les 5 dates de mesures, à partir du LAI déterminé par SUCROS, le modèle SAIL donne une estimation de la réflectance du couvert (Figure 6-11). Comme les processus d'inversion du modèle couplé sont très consommateurs en temps de calcul, nous avons volontairement limité le nombre de situations type de sol x humidité. Au lieu d'explorer systématiquement tous les types de sols et toutes les humidités, nous avons choisi pour chaque date, un type de sol et une humidité. A partir de là, comme dans le chapitre précédant, on utilise les distributions de paramètres de SAIL (réflectances de sol, angles foliaires et propriétés optiques des feuilles) observées dans la région (cf. Chapitre 5) et on produit alors pour chaque date, par tirage dans ces distributions (250 tirages), une distribution de réflectances spectrales de couvert (vert, rouge, pir). On compare alors cette distribution de réflectances avec la réflectance de référence qui est produite par le jeu standard de paramètres de SAIL définis au Chapitre 5 (option 1 ou 2) qui sera utilisée dans le modèle couplé lors de l'assimilation. Cette comparaison donne une mesure de l'erreur introduite par le mode d'estimation des paramètres de SAIL.

On a choisi, comme précédemment de travailler principalement sur le type de sol le plus courant, le LM, à une humidité intermédiaire (10g pour 100g); mais on illustrera l'effet du changement de type de sol et d'humidité (qui génèrent des réflectances de sol plus ou moins proches de celle produite par les options standard) sur les erreurs associées aux réflectances et sur le résultat de l'assimilation.

6.3.1.2 Assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé

6.3.1.2.1 Position du problème

Pour chacune des situations créées:

- les 250 séries (de 5 dates) de réflectances spectrales ainsi simulées représentent les données mesurées qui sont à assimiler;

- la date de semis et les paramètres d'implantation qui ont été utilisés pour la simulation sont les valeurs vraies qu'il s'agit de re-estimer; et
- le rendement donné par la simulation est le rendement vrai qu'il s'agit de prévoir.

Notre étude consiste:

- à réaliser, pour chacune des situations culturelles, l'assimilation des 250 séries de données de réflectance dans le modèle couplé où l'on utilise comme paramètres de SAIL les jeux standard définis au Chapitre 5 (option 1 et 2); et
- à analyser les effets induits par ces situations (positionnement des dates de mesures et effet des erreurs sur les réflectances) sur les résultats.

On cherchera en outre à évaluer l'intérêt comparé des indices de végétation par rapport aux données de réflectance.

6.3.1.2.2 Méthode

L'assimilation consiste à re-estimer 3 paramètres, en minimisant un critère de distance entre réflectances mesurées et réflectances simulées avec les jeux de paramètres standard (option 1 ou 2). Les paramètres retenus (cf. 6.1) sont: la date de semis (*DAYSO*) et 2 paramètres de l'implantation: LAI à la levée (*LAI*) et Somme de température nécessaire à la levée (*SEMERG*). On a fixé pour ces trois paramètres les mêmes gammes de variation que précédemment (cf. Tableau 6-1).

Le critère à minimiser est "l'erreur moyenne" (ou RMSE) (cf. 6.1). Dans le cas de l'utilisation des réflectances, un critère est calculé pour chaque bande spectrale, à chaque itération du processus, et c'est le plus mauvais (donc le plus grand) qui sera minimisé à l'itération suivante et qui détermine donc le sens d'évolution de la recherche des paramètres: dans ce cas, la bande PIR a un poids prépondérant par rapport aux bandes du visible, étant donné les ordres de grandeurs relatifs des réflectances dans ces bandes. On utilise la méthode d'optimisation FSEOPT déjà employée et décrite (6.1 et 6.2).

6.3.1.2.3 Analyse des résultats

On jugera de la qualité des résultats vis à vis de différents critères construits à partir des écarts entre valeurs vraies et valeurs estimées à la fin du processus d'assimilation:

- un critère d'ajustement: le carré moyen d'erreur (ou RMSE) sur les réflectances (ou sur les indices de végétation):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\rho_{vraie} - \rho_{sim})^2}$$

Eq. 6-8

avec n=250.

Ce critère permet d'évaluer la qualité globale de l'ajustement, mais il ne nous suffit pas, car, compte tenu de nos objectifs, les résultats doivent être évalués plutôt/aussi en termes de restitution des paramètres et de précision d'estimation du rendement. On s'intéresse donc aussi à :

- des critères de qualité (erreur moyenne et distribution des erreurs) sur la restitution des paramètres d'implantation et l'estimation du rendement. On a choisi de présenter l'erreur moyenne relative (rapportée à la valeur vraie du paramètre) pour le paramètre *LAI* qui a une gamme de variation très étendue (cf. Tableau 6-3) et donc peu comparable entre types d'implantations.
- un critère analogue (erreur moyenne relative) construit sur le LAI qui est la variable de couplage entre les deux modèles .

$$RRMSE = \frac{1}{LAI_{moy}} \sqrt{\frac{1}{5n} \sum_1^n \sum_1^5 (LAI_{vrai} - LAI_{sim})^2}$$

Eq. 6-9

avec $n=250$ et

$$LAI_{moy} = \frac{1}{5} \sum_1^5 LAI_{vrai}$$

Eq. 6-10

6.3.2 Résultats

6.3.2.1 Étude d'une situation culturale: effet des erreurs sur les réflectances

On a choisi pour traiter cette question la situation d'implantation mauvaise (Q4) et la date de semis moyenne (30 Mars) (cf. Figure 6-10), avec le climat de l'année 1993. Le sol choisi est un LM avec un niveau d'humidité de surface intermédiaire.

6.3.2.1.1 Assimilation des réflectances

La Figure 6-12 montre les différences absolues entre les réflectances et la réflectance standard utilisée par SAIL dans le processus d'assimilation.

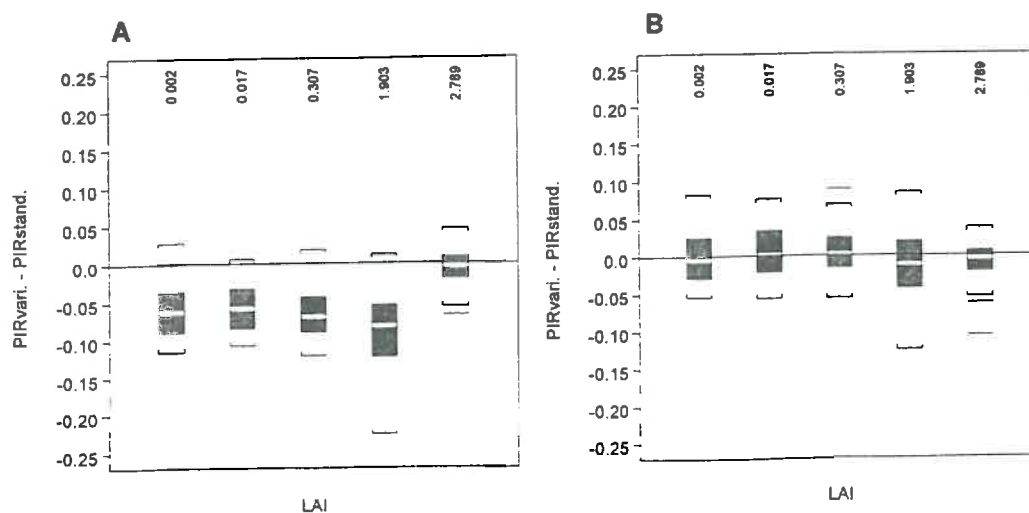


Figure 6-12. Erreurs absolues (réflectance mesurée - réflectance estimée par le jeu standard) sur la détermination des réflectances dans le PIR avec A) option 1 et B) option 2. Sol LM, humidité intermédiaire, Implantation Q4, date de semis 30 Mars.

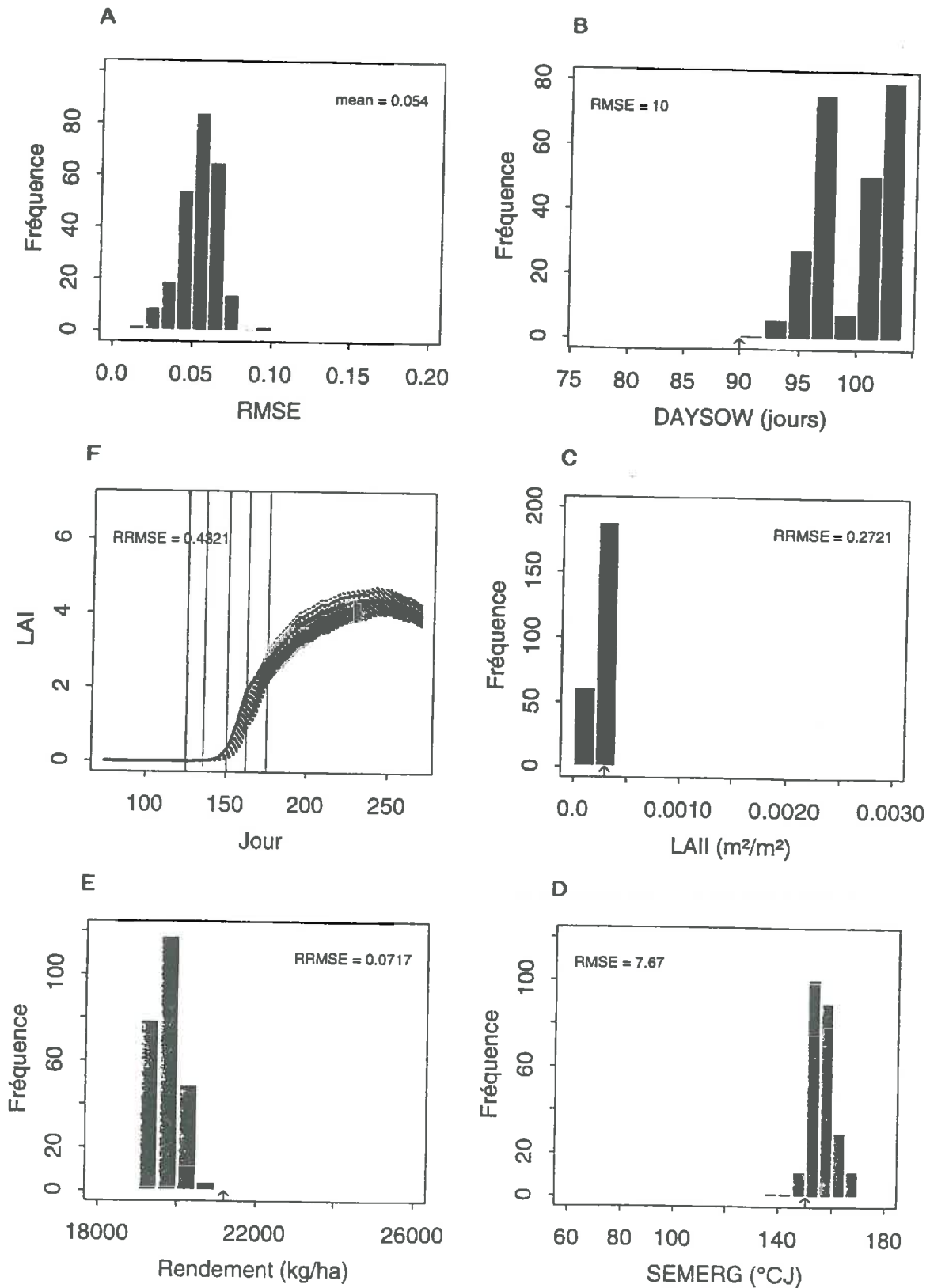


Figure 6-13. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 1 pour l'estimation des paramètres de SAIL. Implantation Q4, date de semis 30 Mars, sol LM humidité intermédiaire. Histogrammes des erreurs moyennes (RMSE) d'estimation sur: A) les réflectances (critère d'ajustement); les paramètres : B) DAYSOW, C) LAII (RMSE relatif), D) SEMERG; E) le rendement (RMSE relatif); F) le LAI (RMSE relatif). Les \uparrow (B,C,D,E) représentent les valeurs vraies des paramètres et du rendement final. Les $|$ (F) marquent les dates d'acquisition des mesures de réflectance et la courbe de LAI correspondant à la situation vraie est figurée en gras.

Ces différences représentent les bruits ou erreurs qui sont associées à la réflectance simulée par SAIL par l'effet des erreurs faites sur les paramètres. On n'a représenté que la réflectance dans le proche infrarouge qui a le poids le plus important dans le calcul de la fonction critère à minimiser.

On constate que l'option 1, qui fournit des réflectances de sol supérieures à la moyenne des réflectances mesurées (car le sol de l'option 1 est un LM sec), entraîne une surestimation des réflectances de couvert pour les 4 premières dates qui correspondent à des valeurs de LAI inférieures à 2.0 (cf. Tableau 6-4), conformément à l'analyse faite au Chapitre 5. On retrouve les différences entre les options 1 et 2 déjà analysées au Chapitre 5: forte réduction du biais par l'option 2, peu d'effet sur la variabilité.

La Figure 6-13 et la Figure 6-14 montrent les résultats des processus d'assimilation réalisés sur les 250 séries de réflectances, avec les options 1 et 2 pour les paramètres de SAIL. On a représenté l'ensemble des critères d'évaluation.

Pour l'option 1, par exemple, on constate que la surestimation des réflectances mesurées qui est faite par le jeu standard donné au modèle SAIL conduit le processus de minimisation des écarts à aller dans le sens d'une diminution de la réflectance. Si l'on considère comment évolue l'algorithme à travers le modèle couplé pour réaliser la minimisation (Figure 6-15), on comprend qu'il cherche à diminuer le LAI en jouant sur les 3 paramètres de SUCROS: décalage de la date de semis vers les semis tardifs, augmentation de la durée semis - levée, sans modification importante du LAI, qui reste dans les valeurs basses de la gamme permise).

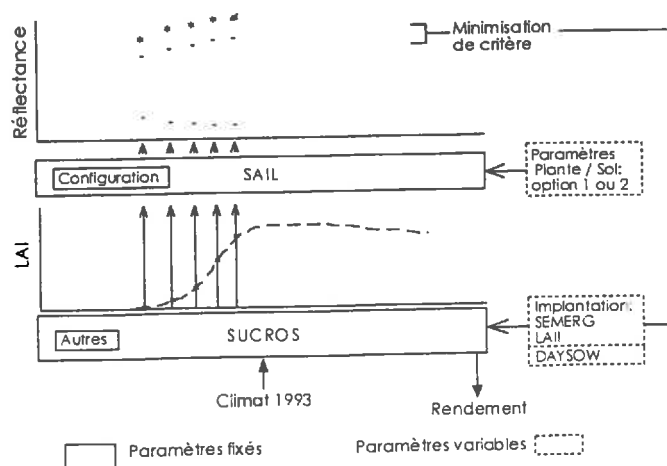


Figure 6-15. Schéma du processus d'assimilation des données de réflectance par le modèle couplé SUCROS+SAIL.

On remarque que pour le paramètre *DAYSO*, la valeur finale atteinte par l'algorithme a souvent été limitée par la borne supérieure de la gamme permise pour ce paramètre; cette situation a été rencontrée également pour *LAI* qui dans 20% des cas touche à la borne inférieure de la gamme permise (on peut imaginer que c'est alors *SEMERG* qui a pris le relais dans la minimisation du critère). C'est surtout sur le paramètre *DAYSO* que se répercutent les erreurs (erreur moyenne de 10 jours), alors que les 2 autres paramètres sont beaucoup plus proches de leurs valeurs vraies (7°C-jours

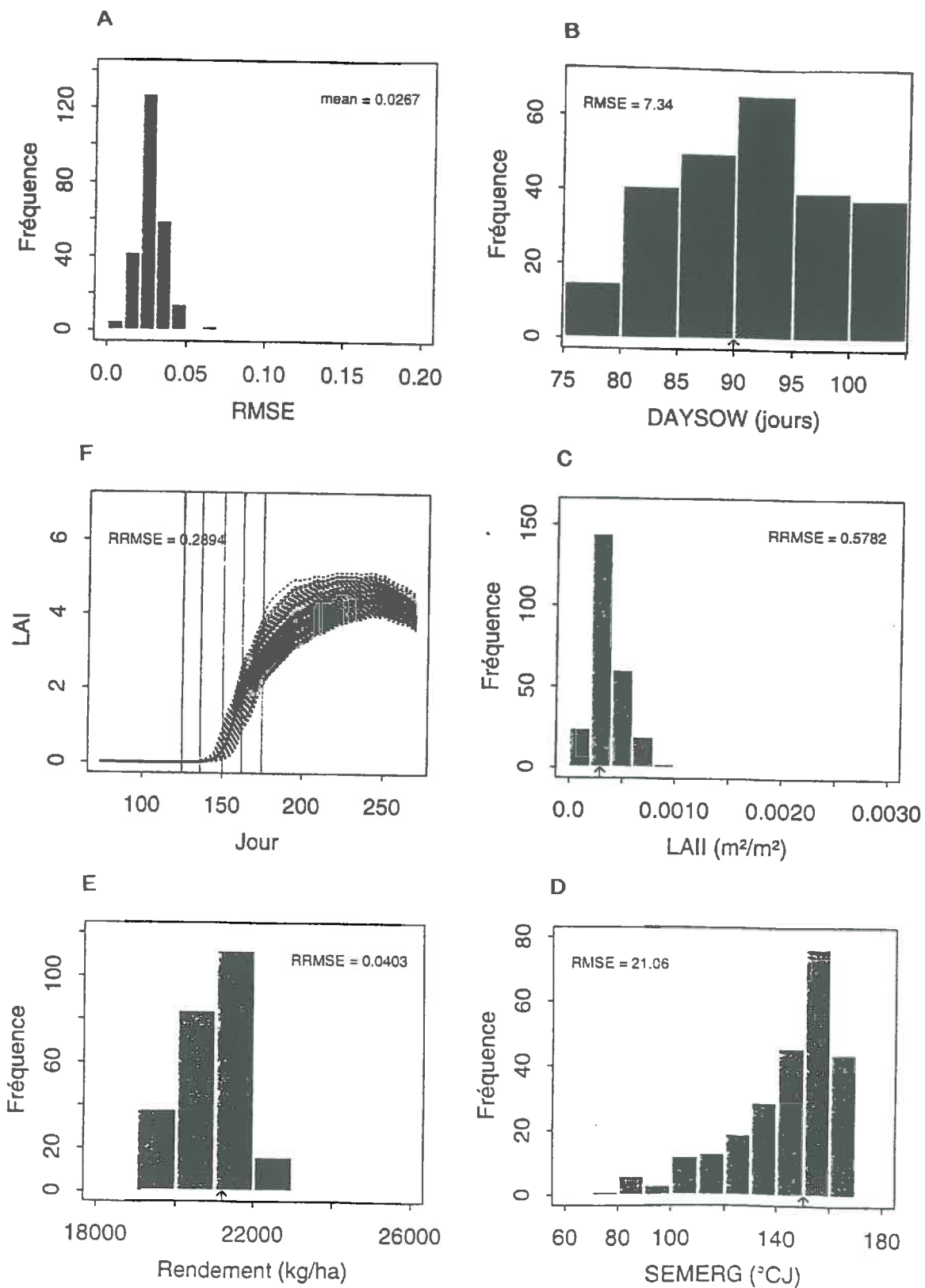


Figure 6-14. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL. Implantation Q4, date de semis 30 Mars, sol LM humidité intermédiaire (voir légende Figure 6-14).

représentent moins d'une journée). Ces valeurs de paramètres conduisent à simuler des courbes de LAI nettement décalées vers des implantations plus tardives, dont certaines ne permettent pas d'atteindre des LAI maximum aussi élevés que la référence. La variabilité des courbes est cependant limitée par le fait que certains paramètres ont des valeurs bornées; cela se traduit également dans des valeurs relativement élevés de l'erreur moyenne d'ajustement (sur les réflectances). Les rendements estimés sont alors naturellement fortement sous-estimés (erreur relative moyenne de 7%).

Avec l'option 2 (Figure 6-14), le biais des réflectances mesurées a disparu, mais la distribution des erreurs est large autour de la valeur zéro, surtout pour les dates 125 et 162. Cela conduit le processus de recherche de paramètres à aller selon les cas dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation de la réflectance, en diminuant ou augmentant le LAI. Pour cela, il joue sur les 3 paramètres. Cela conduit à des résultats beaucoup plus variables que dans le cas précédant pour les paramètres comme pour les variables simulées, mais qui sont mieux centrés par rapport aux valeurs vraies. L'erreur sur *DAYSO*W est réduite à 7 jours, celle sur le *LAI* est légèrement augmentée, comme celle sur *SEMERG* (21°C·jours représentent environ 2 jours). Les valeurs des paramètres sont moins souvent bornées, ce qui conduit à des valeurs plus faibles de l'erreur moyenne d'ajustement sur les réflectances que dans le cas de l'option 1 (0.0267 contre 0.054). Cela, ajouté au recentrage des erreurs, conduit à des courbes de LAI plus variables mais mieux réparties de part et d'autre de la courbe vraie. En conséquence, les erreurs sur les rendements estimés sont également mieux centrées et plus faibles que dans le cas de l'option 1 (erreur relative moyenne de 4%).

L'ensemble des critères que nous venons d'analyser se retrouvent dans le Tableau 6-4. L'amélioration apportée par l'option 2 apparaît nettement sur les trois premiers critères (ajustement, LAI, rendement) qui sont diminués d'un facteur 2. Par contre, l'estimation des paramètres n'est pas franchement améliorée (le biais est cependant supprimé par l'option 2). Cette constatation rejoint nos conclusions du 6-1 où la forme des surfaces de réponse et la forte corrélation entre paramètres laissaient prévoir ces relativement mauvaises performances.

Tableau 6-4. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé. Options 1 et 2, pour un sol LM intermédiaire et un sol LA humide, Implantation Q4, date de semis 30 Mars.

	LM humidité intermédiaire		LA humide	
	option 1	option 2	option 1	option 2
RMSE ajustement	0.054	0.027	0.115	0.011
RRMSE LAI	0.432	0.289	0.515	0.240
RRMSE WSO	0.0720	0.040	0.088	0.033
RRMSE LAII	0.272	0.578	0.306	0.510
RMSE <i>DAYSO</i> W	10.00	7.34	13.03	6.67
RMSE <i>SEMERG</i>	7.67	21.06	6.23	21.69

Pour étudier l'effet du type de sol sur ces résultats, et notamment sur l'écart entre options 1 et 2, nous avons procédé aux mêmes calculs en prenant comme réflectances vraies les valeurs obtenues avec un sol suffisamment différent du sol précédent, et surtout, encore plus éloigné du sol utilisé dans l'option 1 (LM sec). On a choisi un sol plus foncé: un LA humide.

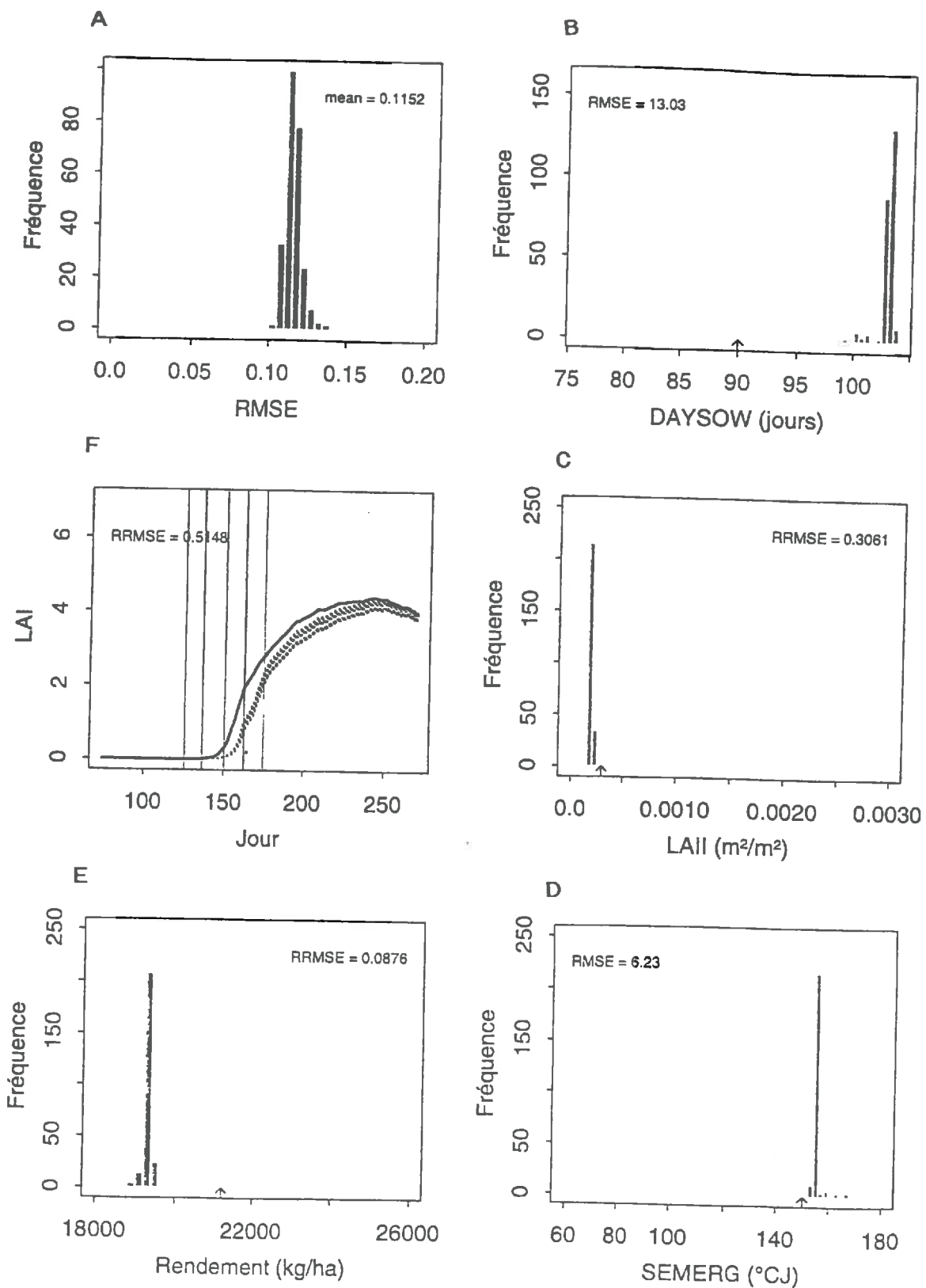


Figure 6-16. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 1 pour l'estimation des paramètres de SAIL. Implantation Q4, date de semis 30 Mars, sol LA humide. (voir légende Figure 6-13).

Les différences absolues entre les réflectances mesurées et la réflectance standard utilisée par SAIL dans l'option 1 sont supérieures à celle du cas précédent, avec un biais dans le même sens, mais une variabilité plus faible. Cela est dû à la plus faible variabilité des réflectances de ce type de sol à cette humidité (cf. Figure 3-28). On retrouve les différences entre les options 1 et 2 déjà vues dans le cas précédent: forte réduction du biais par l'option 2, peu d'effet sur la variabilité.

Ces différences provoquent les mêmes conséquences sur le processus d'assimilation (Tableau 6-4), avec des défauts accrus pour l'option 1 (Figure 6-16): forte tendance à la diminution de la réflectance et donc du LAI en jouant sur les 3 paramètres. Pour réaliser cela, les valeurs des paramètres *DAYSO* et *LAI* atteignent très souvent les bornes des gammes de variation permises. Les courbes de LAI simulées avec ces paramètres sont très en dessous de la courbe vraie, et les rendements sont donc très sous-estimés. Rappelons qu'on ne peut pas comparer les RMSE d'ajustement car les valeurs de réflectance utilisées en entrée sont différentes de celle utilisées pour le LM.

L'option 2, elle, comme dans le cas du LM, conduit à une amélioration très nette des résultats en terme de RMSE d'ajustement, RMSE des LAI et des rendements, et les résultats sont de même ordre que ceux du LM option 2 (Figure 6-17 et Tableau 6-4). L'utilisation de l'option 2 permet de supprimer complètement l'effet du changement du type de sol qui crée une erreur dans l'option 1: on avait constaté au Chapitre 5 la supériorité de l'option 2, capable de prendre en compte les caractéristiques de sol particulière à la situation considérée. On la retrouve ici lorsque cette option est intégrée dans le processus d'assimilation.

6.3.2.1.2 Assimilation des indices de végétation

La Figure 6-18 montre les différences entre les indices NDVI et TSAVI construits à partir des réflectances mesurées et ceux construits à partir des réflectances obtenues avec les options 1 et 2 pour le sol LM.

On constate que, à la différence des réflectances, et conformément à ce qui a été vu au Chapitre 5, le passage aux indices de végétation réduit beaucoup le biais lié à l'option 1 sur les deux premières dates (LAI très faibles): les indices jouent bien leur rôle de minimisation de l'effet du sol (particulièrement TSAVI), de ce fait, la différence entre options est réduite par rapport à ce qui est observé sur les réflectances.

Par contre le biais persiste sur les dates 150 et 162 (qui correspondent à des LAI proches et supérieurs à 2) pour l'option 1 (alors qu'il est éliminé par l'option 2): ce n'est plus l'effet sol qui est en cause, mais celui des angles foliaires et des propriétés optiques (et là TSAVI, semble plus sensible que NDVI).

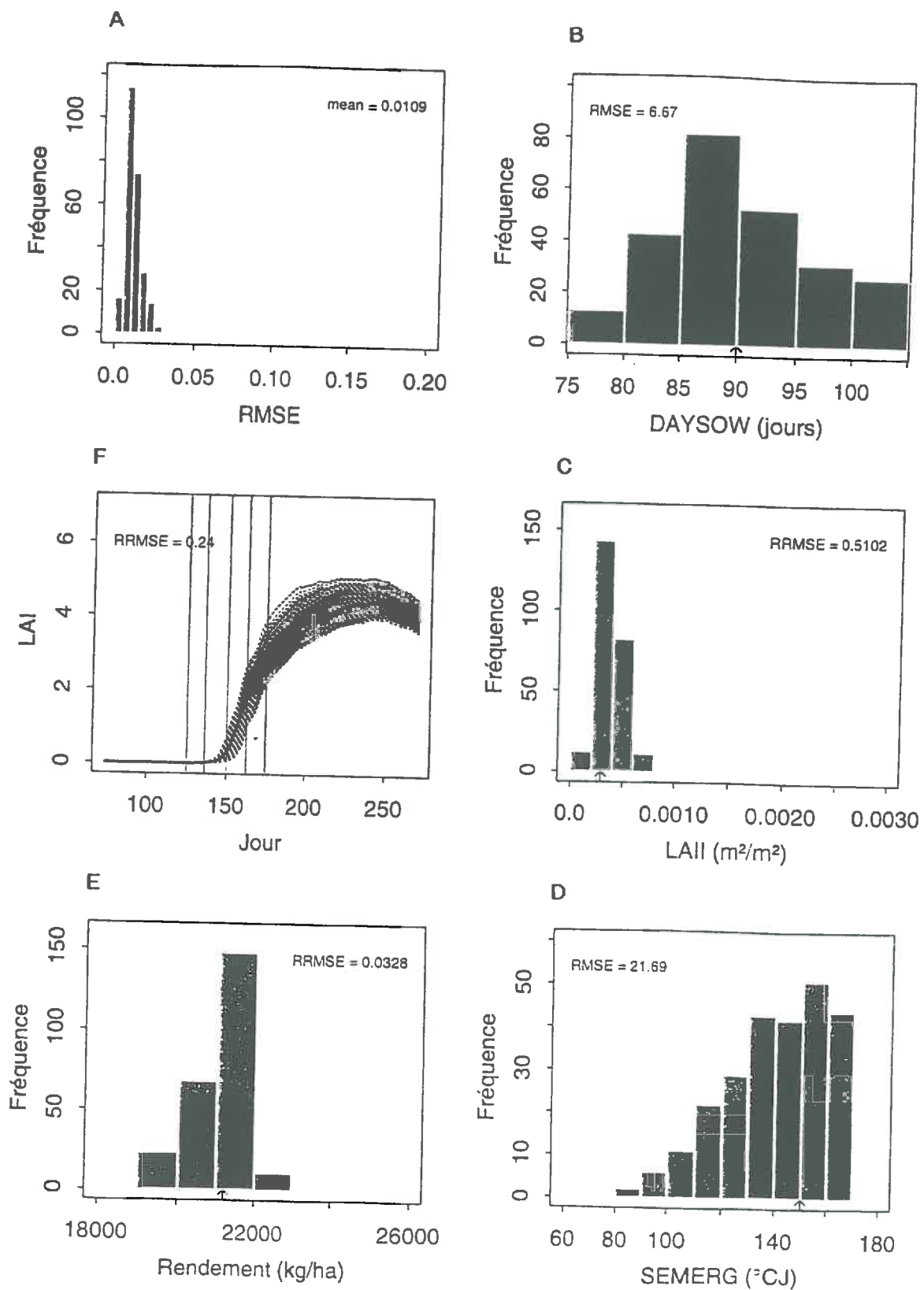


Figure 6-17. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL. Implantation Q4, date de semis 30 Mars, sol LA humide. (voir légende Figure 6-13).

Les résultats de l'assimilation de ces indices mesurés sont montrés dans le Tableau 6-5.

Tableau 6-5. Résultats des 250 processus d'assimilation des données d'indices de végétation dans le modèle couplé. Options 1 et 2, pour un sol LM intermédiaire et un sol LA humide. (Légende: cf. texte).

	LM humidité intermédiaire				LA humide			
	NDVI		TSAVI		NDVI		TSAVI	
	option 1 1	option 2 2	option 1 3	option 2 4	option 1 5	option 2 6	option 1 7	option 2 8
RMSE ajustement	0.018	0.014	0.016	0.015	0.055	0.012	0.023	0.015
RRMSE LAI	0.159	0.215	0.161	0.196	0.386	0.198	0.164	0.263
RRMSE WSO	0.017	0.013	0.028	0.016	0.008	0.014	0.026	0.013
RRMSE LAII	0.578	0.680	0.374	0.646	1.191	0.646	0.442	0.816
RMSE DAYSOW	4.60	3.79	5.73	3.95	2.35	3.86	5.37	3.48
RMSE SEMERG	6.84	7.06	7.68	9.89	12.45	6.50	9.10	8.40

La réduction des erreurs sur les premières dates, par rapport au cas des réflectances, entraîne, pour l'option 1, une réduction importante de la dispersion des LAI simulés. Pour NDVI le RMSE est de 0.159 contre 0.432 et la réduction est du même ordre pour TSAVI (0.161). La réduction des erreurs par les indices (comparés aux réflectances) pour l'option 2 est beaucoup plus limitée (de 0.215 contre 0.289 pour NDVI, 0.196 pour TSAVI). Les constatations sont identiques pour le critère RMSE (rendement) (la comparaison n'est possible pour les RMSE d'ajustement qui ne sont pas calculés sur les mêmes variables) et pour les critères relatifs aux paramètres estimés: l'erreur diminue fortement pour *DAYSOW* et *SEMERG*, les résultats sont moins nets pour *LAII*.

L'intérêt des indices s'affirme nettement par rapport à l'utilisation des réflectances, pour l'ensemble des critères (sauf le pour l'erreur sur *LAII*), mais la différence entre NDVI et TSAVI n'est pas nette. Même si les différences ne sont pas très grandes, l'option 2 donne toujours de meilleurs résultats que l'option 1. Lorsqu'on regarde l'effet du type de sol sur ces résultats en considérant le LAI (Tableau 6-5), on retrouve les mêmes conclusions: intérêt des indices pour minimiser l'effet sol (résultats meilleurs qu'avec les réflectances, même avec l'option 1), la différence entre options est là encore plus importante que pour le LM, qui est plus proche du standard de l'option 1. En tout cas, on vérifie que notre manière d'estimer les paramètres de SAIL avec l'option 2 donne des niveaux d'erreurs analogues pour l'ensemble quel que soit le type de sol (dans le tableau: comparaison des colonnes 6 et 2, 8 et 4, à l'exception de la ligne 1 concernant le RMSE d'ajustement) et quel que soit le type d'indices.

En bilan, il est apparu que la qualité des résultats de l'assimilation des mesures de télédétection est directement liée au niveau des erreurs associées à ces mesures par le choix des paramètres de SAIL.

- L'option 2, élaborée à partir d'une connaissance préalable de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques du sol et des cultures, donne des résultats nettement meilleurs que l'option 1.
- L'utilisation des indices de végétation (NDVI, TSAVI) donne des résultats bien meilleurs que celle des réflectances; on ne note pas de supériorité flagrante d'un indice par rapport à l'autre.

Dans la configuration d'implantation étudiée, les erreurs relatives moyennes (RRMSE) restent à des niveaux assez élevés pour les LAI (20%), mais atteignent des niveaux satisfaisants pour les rendements (1%). L'erreur de restitution des paramètres d'implantation est assez faible: 4 jours pour

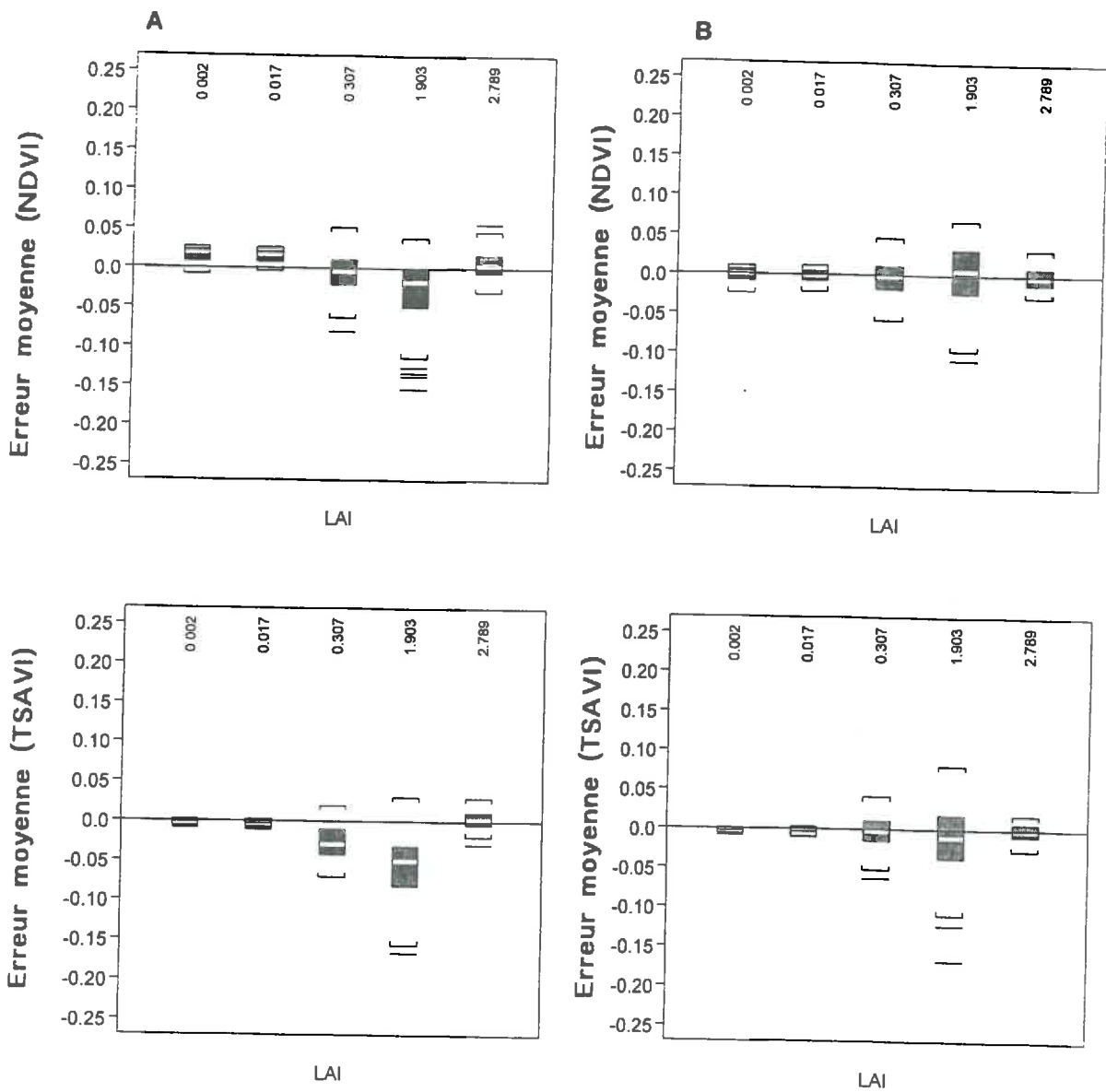


Figure 6-18. Erreurs absolues sur la détermination de NDVI et TSAVI avec A) option 1 et B) option 2. Sol LM, humidité intermédiaire, Implantation Q4, date de semis 30 Mars.

DAYSOW, 7 à 10°C·jour (ce qui représente 1 jour à cette saison) pour *SEMERG* (cela représente 10% de la gamme de variation autorisée); l'erreur la plus forte est sur le *LAI*, avec 60 à 70%: cette erreur relative est forte, compte tenu des valeurs faibles de *LAI* pour l'implantation étudiée, mais elle représente une faible variation par rapport à l'amplitude de la gamme de variation autorisée pour ce paramètre.

6.3.2.2 Étude de l'ensemble des situation culturales: effet des dates de mesure et des erreurs sur les réflectances

Pour traiter cette question, on considère l'ensemble des situations culturales, qui sont censées représenter l'ensemble de la gamme des situations possibles à l'échelle d'une région (Figure 6-10). On a une grande gamme de courbes d'évolution du LAI, depuis les implantations bonnes (Q1) à date de semis précoce (Q11) jusqu'aux implantations mauvaises (Q4) à dates de semis tardive (Q43). Certaines courbes sont très proches: Q1 semé à une date moyenne et Q2 semé à une date précoce; Q2 semé à une date moyenne et Q1 semé à une date tardive. On retrouve les résultats de Brochery (1996), montrant que Q4 est nettement disqualifié et n'arrive jamais au niveau de LAI des autres types d'implantations. On constate que selon le type de situation les niveaux de LAI atteints aux dates d'acquisition des mesures de télédétection sont très différents (Tableau 6-6): de 0.0007 à 0.18 pour le jour 125, de 0.005 à 1.12 pour le jour 136, de 0.08 à 4.33 pour le jour 150, de 1.01 à 5.37 pour le jour 162, de 2.36 à 5.36 pour le jour 175. Ces différences de niveau vont nous permettre d'analyser l'effet des positionnement des dates de mesures par rapport à l'état de croissance, combiné bien sûr à l'effet des erreurs sur les réflectances simulées par SAIL.

Pour cette analyse, on choisit l'un des indices, TSAVI, avec l'option 2 qui a donné les meilleurs résultats.

Tableau 6-6. Niveaux de LAI atteints aux différentes dates d'acquisition par les 9 situations d'implantation. Type d'implantation 1, 2, 4; dates de semis 1 (15 Mars), 2 (30 Mars), 3 (15 Avril).

Date d'acquisition → Implantation ↓	125	136	150	162	175
Q1-1	0.187	1.128	4.329	5.371	5.359
Q1-2	0.054	0.382	2.871	4.679	4.972
Q1-3	0.006	0.046	0.808	2.378	2.974
Q2-1	0.070	0.495	3.414	5.413	5.413
Q2-2	0.021	0.150	1.766	4.119	4.732
Q2-3	0.002	0.017	0.307	1.903	2.789
Q4-1	0.018	0.130	1.641	4.454	5.198
Q4-2	0.006	0.040	0.736	3.128	4.518
Q4-3	0.001	0.005	0.830	1.006	2.355

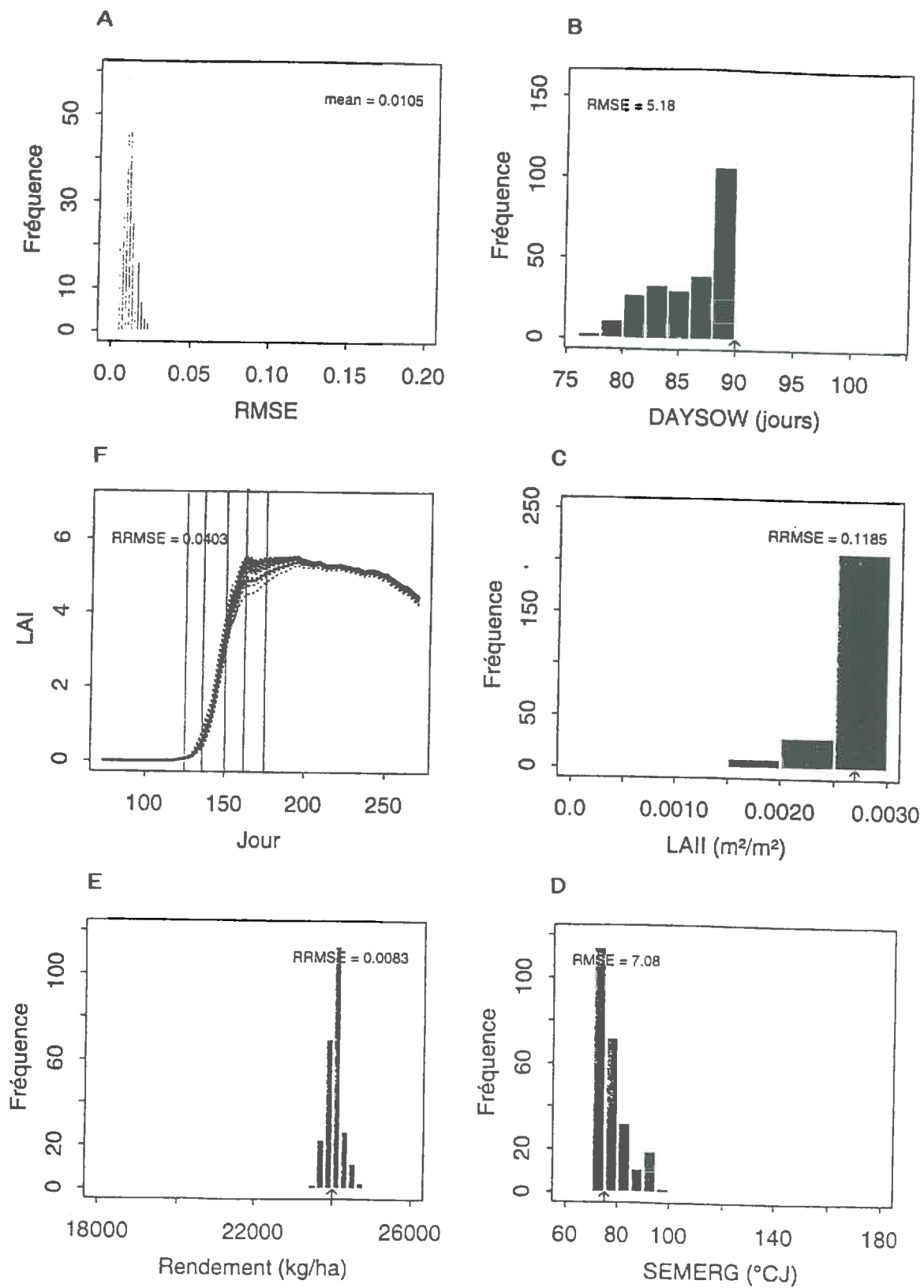


Figure 6-20. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI dans le modèle couplé avec l'option 2. Sol LM, humidité intermédiaire. Implantation Q1, date de semis 15 Mars (Q1-1)(voir légende Figure 6-13).

Rappel de la méthode:

Pour chacune des 9 situations, on a calculé, pour chaque date, en fonction du niveau de LAI, 250 valeurs de réflectances spectrales et les erreurs associées, puis le TSAVI et les erreurs associées. Ce sont ces 250 séries de 5 dates de TSAVI qui ont ensuite été assimilées par le modèle couplé, en utilisant l'option 2 pour SAIL.

Si on prend le cas d'une implantation plus précoce, Q1 semé le 15 Mars (Q1-2), les niveaux de LAI atteints au moment des mesures (0.07, 0.5, 3.4, 5.4, 5.4) sont associés à des erreurs sur le TSAVI toujours faibles et bien centrées autour de zéro (Figure 6-19): pour les faibles LAI, c'est l'intérêt connu de TSAVI qui minimise les effets sol; pour les forts LAI (>3), TSAVI n'est plus sensible à une variation des angles foliaires.

Le résultat de cette configuration {LAI/date des mesures} apparaît à la Figure 6-20. Les faibles niveaux d'erreur associés aux forts niveaux de LAI font que l'algorithme de minimisation modifie très peu les LAI, et les paramètres d'implantation. Tous les critères d'évaluation des résultats sont très bons. L'erreur d'estimation du rendement est inférieure à 1%. La cassure dans les courbes de LAI qui intervient après le jour 162, semble due à une série de jours à très faible rayonnement (et températures plutôt fraîches) survenue entre les jours 162 et 166.

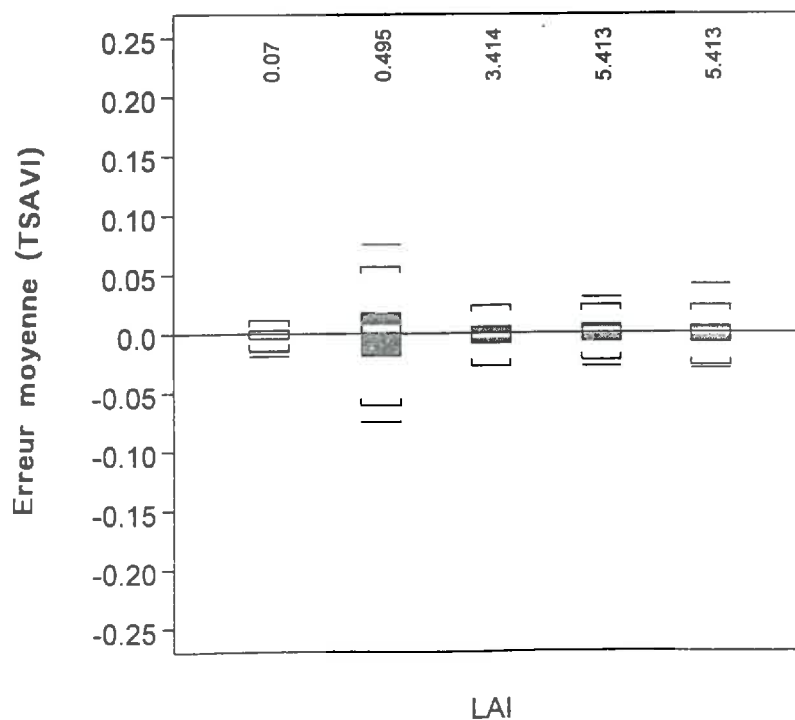


Figure 6-19. Erreurs absolues sur la détermination de TSAVI avec l'option 2. Sol LM, humidité intermédiaire. Implantation Q1, date de semis 30 Mars.

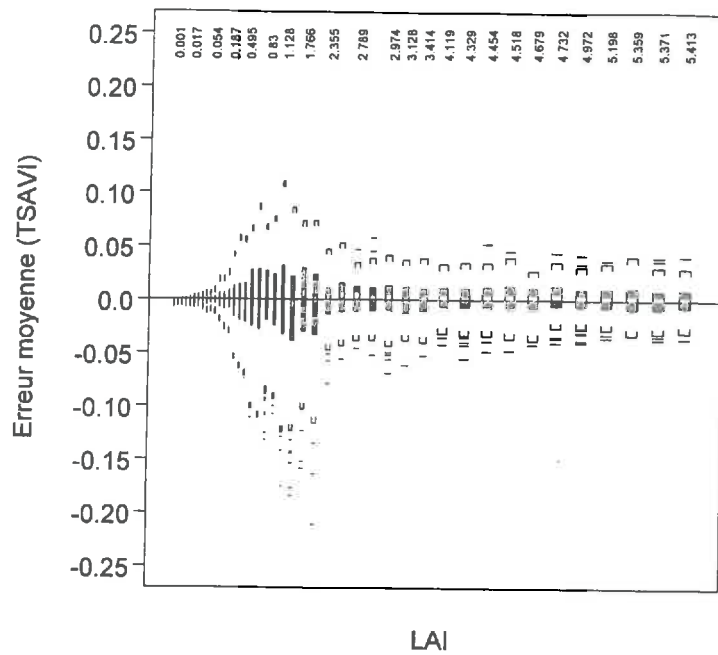


Figure 6-21. Erreurs absolues produites sur les TSAVI aux différentes dates pour les différentes implantations (cf. texte).

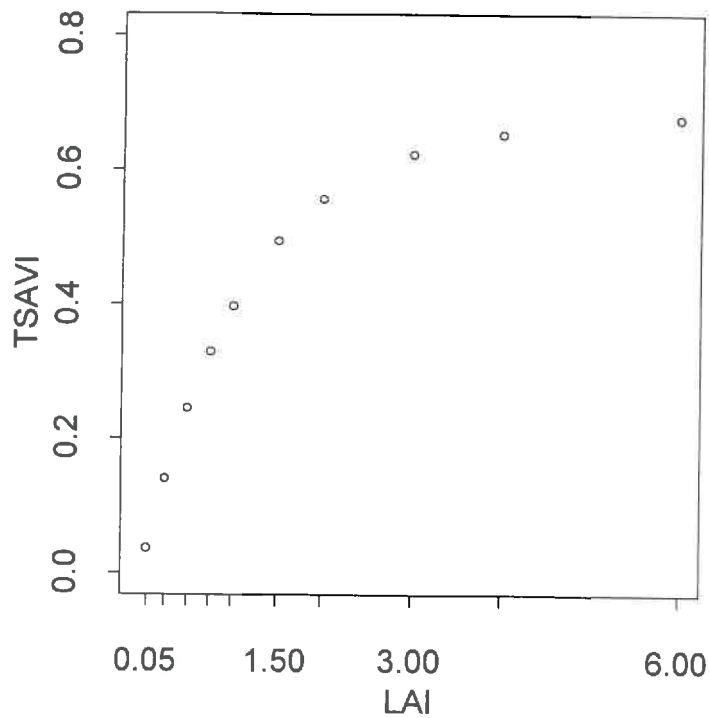


Figure 6-22. Relation TSAVI-LAI , obtenue pour des LAI de 0.05 à 6.0, avec SAIL, option 2.

Afin de passer à l'analyse des résultats obtenus pour l'ensemble des situations, il est important d'examiner 2 points:

- la distribution des erreurs dans les TSAVI calculés à partir des réflectances mesurées aux différentes dates et pour les différentes implantations
- la nature de la relation entre TSAVI et LAI, qui explique comment une erreur sur TSAVI provoque une erreur sur LAI.

La Figure 6-21 représente la distribution des erreurs qui ont été produites sur TSAVI pour l'ensemble des dates et des implantations, selon le niveau de LAI atteint à ces dates (Tableau 6-6). On retrouve globalement: de très faibles erreurs pour les très faibles LAI (<0.1), des erreurs plus importantes pour la gamme de LAI 0.3-2.0, et une réduction de l'erreur pour les LAI supérieurs à 2. Ces distributions sont expliquées par la manière dont ont été créées les données de réflectance avec les règles de variabilité des paramètres, indexées au niveau de LAI (on se rappelle le rôle charnière du stade LAI=2 dans ces règles).

La Figure 6-22 montre la relation TSAVI-LAI, pour une gamme de LAI de 0.05 à 6.0. La relation est de type exponentielle décroissante, avec une partie quasi-linéaire, de forte pente pour la gamme de LAI de 0 à 2.0, où le TSAVI est très sensible à toute variation du LAI (et inversement) et une partie, au delà de LAI=2.0, où TSAVI devient beaucoup moins sensible à une variation de LAI (et inversement).

Selon l'implantation considérée, les 5 acquisitions de mesures correspondent à une série de niveaux de LAI, qui déterminent les niveaux d'erreur sur les TSAVI associés et le niveau de sensibilité du LAI au TSAVI. Ces éléments sont importants dans la procédure de minimisation. Ainsi, plus l'implantation est précoce, plus les dates de mesures correspondent à des LAI forts, avec peu d'erreur, peu de sensibilité de LAI au TSAVI: il en résulte une faible perturbation autour de la situation de référence et de bons résultats en termes d'estimation de LAI (Figure 6-23), et de rendement (Tableau 6-7). De plus, les paramètres sont bien estimés. C'est le cas de Q1-1 qui a déjà été vu, et de Q1-2.

Tableau 6-7. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI, option 2 dans le modèle couplé. {Implantation Q1, Q2, Q4} × {date de semis 15 Mars, 30 Mars, 15 Avril}. Sol LM, humidité intermédiaire. (Légende: cf. texte).

LM 10%	Jour de semis=75			Jour de semis=90			Jour de semis=105		
	Q11	Q12	Q14	Q11	Q12	Q14	Q11	Q12	Q14
	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2	TSAVI SAIL 2
RMSE d'ajustement	0.0211	0.0115	0.0183	0.0106	0.0116	0.0146	0.0147	0.0179	0.0079
RRMSE LAI	0.0401	0.1231	0.4026	0.037	0.1052	0.1957	0.0991	0.1124	0.146
RRMSE WSO	0.0067	0.0143	0.0247	0.0077	0.0101	0.0155	0.0274	0.0197	0.0211
RRMSE LAII	0.0778	0.7358	1.7007	0.1111	0.3017	0.6463	0.3481	0.2575	0.2381
RMSE DAYSO	1.63	10.42	13.3	4.93	3.09	3.95	16.65	11.51	6.09
RMSE SEMERG	1.84	31.15	33.11	7.2	9.64	9.89	47.46	36.33	6.53

Par contre, plus l'implantation est tardive, plus les dates de mesures correspondent à des LAI plus faibles, où les dernières des 5 dates (LAI autour de 2, ex: Q4-1) ont des niveaux d'erreur importants, et une grande sensibilité de LAI au TSAVI: il en résulte une forte perturbation autour de la situation de

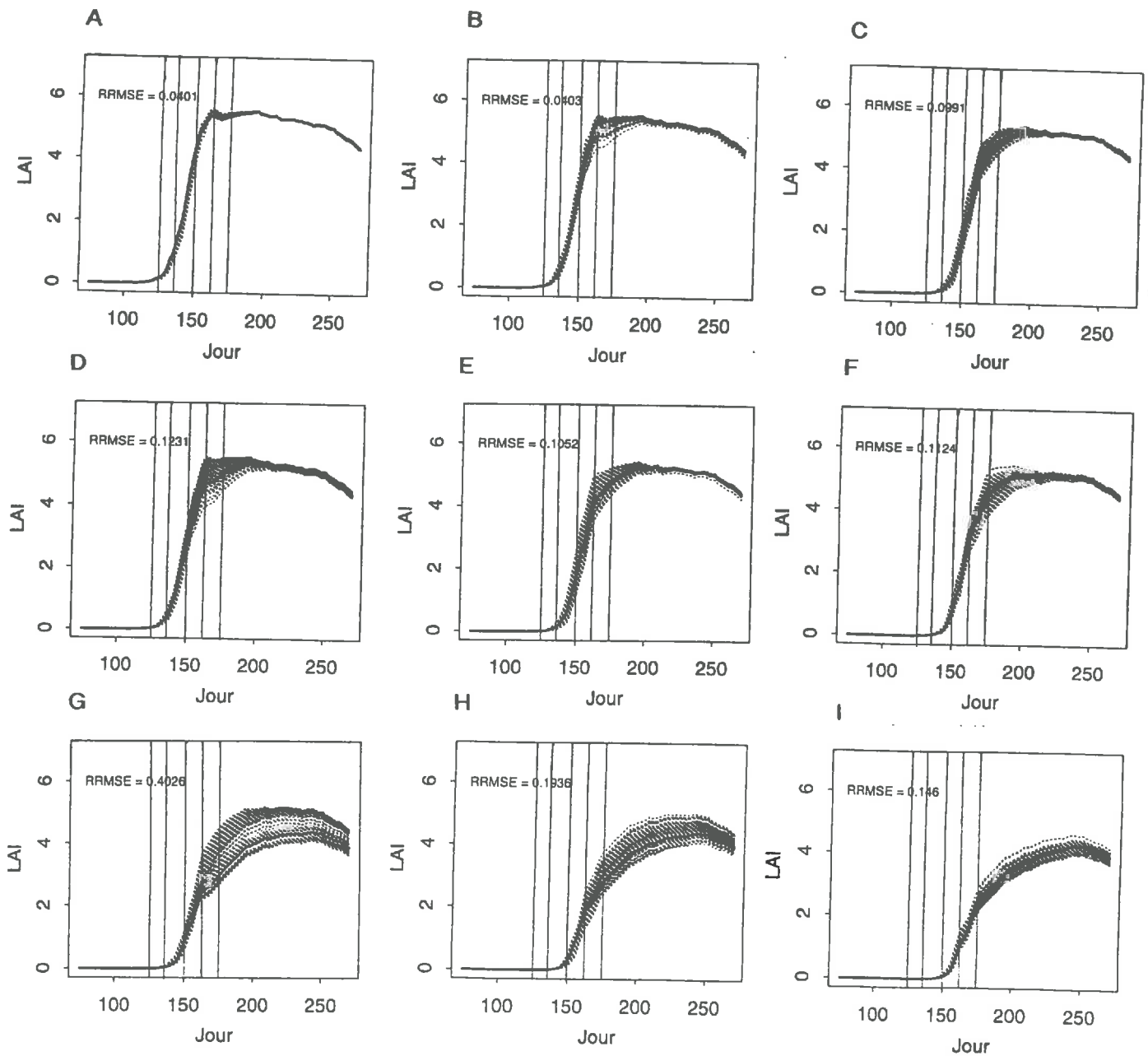


Figure 6-23. LAI estimés à la fin des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI dans le modèle couplé avec l'option 2 pour les différentes situations {Implantation x date de semis} A) Q1-2, B) Q1-3, C) Q2-1, D) Q2-2, E) Q2-3, F) Q4-1, G) Q4-2, H) Q4-3. (Sol LM, humidité intermédiaire).

référence et des résultats beaucoup moins bons en termes d'estimation de LAI (Figure 6-23), et de rendement (Tableau 6-7). De plus, les paramètres *DAYSOW*, *SEMERG* et *LAI* sont beaucoup moins bien estimés. C'est le cas des implantations de type Q4 en général (dont Q4-2 qui a déjà été vu). Dans ces situations, le problème est amplifié par le mode de calcul du critère minimisé: les dernières dates, qui correspondent à des LAI plus forts que les premières, ont un poids plus important dans le calcul du critère.

Les implantations intermédiaires (Q2) ont des performances intermédiaires.

On constate que les erreurs relatives moyennes sur les LAI, qui vont de 4 à 40% selon les situations, se traduisent par des erreurs de seulement 0.1 à 3% sur les rendements. Cela est dû au fait que ce sont les erreurs sur les LAI forts qui contribuent fortement à l'augmentation de l'erreur moyenne, et que ces erreurs sur les LAI forts (supérieurs à 3), n'ont que peu d'incidence sur le niveau d'interception de la lumière et donc sur la production d'assimilats (à ces niveaux de LAI, l'interception est quasi maximale); par contre, elles en ont sur le niveau de la respiration d'entretien (les situations avec les niveaux de LAI plus faibles dépensent moins d'assimilats pour leur entretien); le bilan en terme de production de biomasse est donc peu différencié. C'est le cas de Q4-1 où la variabilité du LAI intervient sur les dernières dates.

En bilan de cette étude sur l'effet du positionnement des dates de mesures, il apparaît que:

- Les résultats de l'assimilation des données de télédétection dans le modèle couplé dépendent du positionnement des dates d'acquisition définies par une configuration d'acquisitions déterminée vis à vis du stade de croissance de la culture. Ils dépendent donc en particulier des situations {conditions d'implantation × date de semis}, mais aussi du type d'année climatique qui modifient ce positionnement. Pour l'année 93 que nous avons utilisée et qui est considérée comme une année climatique moyenne, les erreurs relatives moyennes vont de 4 à 40% pour les LAI; elles vont de seulement 0.1 à 3% sur les rendements. Comme on l'a déjà dit, la liaison entre le niveau d'erreur sur le LAI et celui sur le rendement dépend lui aussi du positionnement des dates d'acquisition vis à vis du stade de croissance de la culture. Cette erreur relative résiduelle sur le rendement doit être comparée à l'analyse de sensibilité faite par Brochery (1996) et qui montrait, pour 1993, que l'amplitude maximum de variation des rendements obtenus pour des qualités d'implantation extrêmes et une gamme de dates de semis de 1 mois (du 15 Mars au 15 Avril) était de 20%. En d'autres termes, dans une région donnée, pour une année donnée, en conditions de culture optimales, les rendements peuvent être estimés avec le seul modèle SUCROS avec une incertitude de l'ordre de 20%.: cette incertitude peut être réduite selon les cas à 3. à 0.1%, grâce à l'assimilation de 5 données de télédétection acquises pendant la phase d'installation du couvert (en supposant qu'il n'y a pas d'erreur sur les mesures de réflectances mesurées).
- Toujours pour l'année 93, les erreurs sur les paramètres sont plus importantes que sur les LAI ou le rendement: de 1 à 16 jours pour *DAYSOW*, de 2 à 48°C·jours pour *SEMERG* (ce qui représente de

1 à 5 jours), de 7 à 170% pour LAII. Cela rejoint les conclusions de notre analyse faite au 6-1, où la forme des surfaces de réponse du critère annonçait la non-unicité des solutions pour l'inversion du modèle, confirmée par l'analyse des effets des erreurs.

- On retrouve avant tout l'effet des erreurs étudié précédemment, associé à celui de la sensibilité de TSAVI à LAI: dans la configuration d'acquisition adoptée, plus on a de dates coïncidant avec des LAI élevés, donc, plus l'implantation est précoce et rapide, plus la précision d'estimation des LAI, des rendements et des paramètres est grande. Ce résultat nous surprend dans la mesure où l'on pensait que des mesures assez précoces étaient nécessaires. Nous savons, par les résultats d'autres auteurs (Moulin, 1995) que des mesures coïncidant uniquement avec la phase où le LAI est élevé ne donneraient pas de bons résultats car elles ne permettraient pas de caler correctement la phase d'installation. En fait, il est important d'avoir des mesures dans la phase d'installation, y compris jusqu'à des LAI forts.

Conclusions

Conclusion

La question que nous nous étions posée au début de ce travail était de développer et évaluer une méthode de correction de l'étalonnage d'un modèle de simulation de culture, par assimilation de données de réflectances en cours de culture. L'objectif est d'appliquer cette méthode sur de grands domaines d'espace, où un certain nombre de paramètres de ce modèle peuvent être très variables et où le modèle seul, avec ses jeux de paramètres standards ne peut simuler correctement la croissance et le rendement des cultures. Ce travail était consacré à la culture de la betterave sucrière, dans le nord de la France, où, du fait de l'évolution des techniques (dates de semis de plus en plus précoces) et du contexte pédoclimatique, l'implantation des cultures au printemps peut donner dans une même région des résultats très variables.

Dans ce cadre, et en se limitant dans un premier temps à un modèle décrivant le fonctionnement de la culture en conditions de croissance potentielle, cette question s'est traduite en un problème d'inversion d'un modèle de culture \times modèle de réflectance, pour estimer des paramètres caractéristiques des résultats de la phase d'implantation. Cette manière de définir la problématique d'assimilation de données de réflectances dans un modèle de culture, dans un contexte agronomique précis où l'on identifie les paramètres "déficients" du modèle, est assez différente de ce qui a pu être fait dans d'autres travaux, où les différents paramètres du modèle peuvent être utilisés indifféremment pour assurer l'ajustement entre réflectances simulées et mesurées. Notre objectif est en effet double: disposer d'une méthode d'estimation (et de prévision) des rendements à l'échelle de régions (ex.: bassins d'alimentation de sucreries) mais aussi d'un outil permettant de retrouver des caractéristiques locales (pour chaque parcelle d'une région) de la croissance de la culture et d'en suivre le déroulement dans le temps. C'est pourquoi, dans le travail qui a été mené, nous nous sommes toujours intéressés autant à l'estimation des rendements en fin de cycle, qu'à la bonne description de la mise en place et de l'évolution du couvert foliaire, et à l'estimation des paramètres caractéristiques de la phase d'implantation.

Cette préoccupation nous a conduit à regarder de plus près la question de l'estimation des paramètres d'implantation à partir de mesures de la croissance foliaire et à constater que, si l'on arrivait toujours à décrire correctement cette croissance à partir d'un certain nombre de mesures de télédétection, à cause des relations particulières entre paramètres, leur estimation précise n'était pas garantie, dès lors que des erreurs étaient associées aux mesures.

Or cette question des erreurs constitue un point majeur dans la stratégie d'assimilation des données de réflectance dans un modèle de culture: s'il est vrai que les mesures de télédétection apportent une information précieuse sur l'état de développement des cultures dont le modèle de culture peut "profiter", encore faut-il que les erreurs qui sont faites dans l'interprétation de ces mesures n'apportent pas une perturbation plus grande des résultats. Cette question des erreurs a souvent été abordée du

point de vue de l'erreur faite sur la mesure elle-même (d'origine instrumentale ou liée à la correction des effets atmosphériques). S'il est vrai que ces sources d'erreurs sont importantes, elles ont été déjà étudiées, il nous est apparu qu'il était essentiel de quantifier également l'erreur qui provient de la démarche d'assimilation elle-même, par le modèle de réflectance. En effet, outre la variable de couplage qu'est le LAI et qui est fournie par le modèle de culture, d'autres caractéristiques du sol et de la culture elle-même interviennent et le mode d'estimation de ces caractéristiques est primordial.

Nous avons montré qu'une analyse préalable des distributions de ces caractéristiques dans l'espace et dans le temps (qui n'ont rien d'aléatoire), permet de dégager des règles d'estimation qui diminuent fortement les erreurs commises dans le processus d'assimilation, à la fois sur la simulation des réflectances, sur les résultats de l'inversion (estimation des paramètres d'implantation), et sur l'estimation des courbes de croissance du LAI ainsi que sur le rendement final. La composante la plus importante des erreurs commises dans le processus d'assimilation des réflectances, intervient pour les niveaux de LAI faibles où la réflectance du sol contribue fortement à la réflectance du couvert et où toute imprécision sur les caractéristiques du sol (type, humidité, rugosité) conduit à une erreur importante sur la réflectance simulée par le modèle SAIL. On a vérifié que l'utilisation d'indices de végétation permettait de réduire en partie cette sensibilité à l'erreur d'estimation des paramètres de SAIL.

Le deuxième aspect très important que nous avons étudié, pour évaluer les performances de cette méthode dans une application à l'échelle de régions, est l'influence de la position des dates de mesures de télédétection vis à vis des stades de croissance. Cette position est par définition variable, d'une part du fait des contraintes techniques et climatiques que l'on connaît sur l'acquisition d'images de télédétection, et d'autre part, du fait de la variabilité des situations culturales qui existe à l'échelle d'une région, sous l'effet des différentes dates de semis et différentes conditions d'implantation. Plusieurs éléments jouent, dans des sens opposés, dans l'influence de la position des dates de mesures vis à vis du stade de croissance, au travers de la relation paramètres d'implantation - réflectance, au travers des 2 modèles. Ils se classent en 2 groupes:

1. Ceux qui jouent sur la relation réflectance (ou indice de végétation)-LAI et qui font que, pour réduire un écart donné entre réflectance simulée et mesurée, il faut produire, par le modèle SUCROS, une variation correspondante du LAI. Parmi ces facteurs:
 - la sensibilité de la relation entre réflectance ou indice et LAI (ou pente de la relation), qui est d'autant plus faible que le niveau de LAI est grand; et
 - le niveau d'erreur dans le mode d'estimation des paramètres du modèle SAIL, qui induit une erreur d'autant plus grande que le LAI est faible;

2. Ceux qui jouent sur la relation LAI-paramètres d'implantation et qui font que, pour produire la variation de LAI attendue (qui réduira l'écart entre réflectance simulée et mesurée envisagé précédemment), on va modifier les paramètres d'implantation. Parmi ces facteurs:

- la sensibilité dans le modèle de culture du LAI vis à vis des paramètres de l'implantation, qui diminue quand on s'éloigne trop du début de la croissance; et
- le poids de chaque mesure dans le calcul du critère de minimisation utilisé par l'algorithme d'inversion (d'autant plus fort que la mesure intervient à un moment où la réflectance ou l'indice de végétation est élevé).

Nous avons pris le parti de procéder à l'analyse des effets globaux de ces facteurs, en simulant des configurations réalistes d'acquisitions de données et de variabilité des états de croissance. Il ressort de cette analyse que, contrairement à l'idée que nous avons au départ, s'il est important que les dates d'acquisition coïncident bien avec la phase d'installation du couvert, on a de meilleurs résultats si elles permettent de caractériser également le moment de l'atteinte du plateau de LAI, dans des gammes qui se situent pourtant dans les faibles sensibilités de la relation indice de végétation - LAI, mais où les niveaux d'erreur sont faibles. On trouve que, en l'absence d'autres sources d'erreurs que celles liées à l'estimation des paramètres de SAIL, 5 dates réparties dans la phase d'installation du couvert, permettent de faire diminuer l'incertitude sur les rendements de 20% à 3 ou 0.1% selon les configurations, ce qui est très intéressant. Les résultats en terme d'estimation des paramètres eux-mêmes sont intéressants, mais moins précis, non pas tant pour le jour de semis que pour les deux paramètres somme de température nécessaire à la levée et état de croissance initial des plantules. On doit donc être modérément ambitieux vis-à-vis de cet objectif, qui peut cependant être atteint pour ce qui est de l'analyse des grandes tendances.

Au terme de ce travail, on dispose d'un modèle de simulation, qui semble correctement adapté à la simulation de la culture de betterave dans le Nord de la France, en l'absence de facteurs limitants. On dispose également d'une méthode d'assimilation de données de réflectances qui a été évaluée vis-à-vis de ses performances potentielles et vis-à-vis d'une application en grandeur nature, après un travail de caractérisation de la variabilité des caractéristiques des sols et de la végétation dans ces conditions.

La suite de ce travail consistera, entre autres choses, à faire une validation de l'ensemble de la méthode sur les régions représentatives de bassins d'alimentation de sucreries. Cet aspect, qui devait originellement faire partie de ma thèse et qui a donné lieu à une grande campagne de mesures en 1995 n'a pu être traité, en particulier parce que les hypothèses de conditions de culture optimales n'étaient pas respectées (stress hydrique important). On a donc préféré la différer, en se donnant les moyens d'avoir un modèle plus complet (SUCROS2-betterave, mis au point par B. Bouman AB-DLO, Wageningen), avec description du bilan hydrique dans le sol, de la consommation d'eau par la culture et des effets du stress hydrique, ce qui est maintenant réalisé. La campagne de mesures réalisée en

'95, et à laquelle j'ai participé, portaient sur 2 bassins sucriers et a mobilisé au sol un très grand nombre de personnes, tant de l'I.N.R.A. que de l'I.T.B. et des sucreries: un ensemble important de données ont été collectées sur une cinquantaine de parcelles sélectionnées pour bien représenter la variabilité des conditions de sol et dates de semis. Les données de télédétection ont été acquises grâce aux moyens aéroportés octroyés par le Programme National de Télédétection Spatiale (2 vols de l'avion ARAT équipé du radiomètre Pushbroom du C.N.E.S.), et à l'achat d'images SPOT. Au sol, des mesures permettant la validation globale de la méthode ont été collectées (mesures précises par les sucreries des rendements, sur des surfaces délimitées à l'avance), ainsi que des validations intermédiaires (dynamiques et taux de levées; structure et propriétés optiques des feuilles, humidité du sol le jour des vols). Cet ensemble de données représentatif d'un domaine d'espace suffisamment large permettra de donner une bonne idée des performances réelles de la méthode en grandeur nature, y compris avec l'ensemble des facteurs non contrôlés.

L'introduction d'un aspect prévisionnel, qui intéresse beaucoup nos partenaires de l'interprofession betteravière, devrait être abordée ensuite, en développant les approches probabilistes que permettent maintenant les générateurs climatiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Allen, W.A., Gayle, T.V., et Richardson A.J., 1970. Plant canopy irradiance specified by the Duntley equations. *Journal of the Optical Society of America*. 60(3):372-376.
- Andrieu, B., Chelle, M., Clastre, P., et Sohbi, Y., 1995. Modélisation des échanges radiatifs à partir de maquettes informatiques. *In Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en bioclimatologie*, Le Croisic, avril 1995, Editions INRA, Paris. Tome I. pp.351-369.
- Aries, F., Prevot, L., et Monestiez, P., 1993. Geometrical canopy modelling in radiation simulation studies. *In Crop structure and light microclimate-Characterization and applications*, C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet (Eds), Editions INRA, Paris. pp.159-173.
- Asrar, G., Kanemasu, E.T., Jackson, R.D., et Pinter, P.J. 1985. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 17:211-220.
- Attema, E.P.W., et Ulaby, F.T. 1978. Vegetation modelled as a water cloud. *Radio Science*. 13(2):357-364.
- Badwhar, G.D., Verhoef, W., et Bunnik, N.J.J. 1985. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*. 17:179-195.
- Baret, F. 1988. Un modèle simplifié de réflectance et d'absorbance d'un couvert végétal. *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. pp.113-120.
- Baret, F. 1992. Franco-English collaborative reflectance experiment. Franco-English collaborative reflectance experiment. Experiment III, July-August 1990., INRA, AFRC, University of Nottingham. 29p.
- Baret, F., et Podaire, F. 1988. SAIL:un modèle de réflectance de couverts végétaux:présentation et analyse de sensibilité. *Téledétection spatiale:aspects physiques et modélisation*. pp.741-752.
- Baret, F., et Olioso, A. 1989. Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé. *Agronomie*. pp. 885-895.
- Baret, F., et Guyot, G. 1991. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35:161-173.
- Baret, F., Jacquemoud, S., et Hanocq, J.F. 1993. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*. 7:65-82.
- Baret, F., Jacquemoud, S., Andrieu, B., Danson, M., et Jaggard, K., 1994. Model inversion to retrieve canopy characteristics from high spectral resolution data. *Proceedings of the Sixth International Symposium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France. pp.181-192.
- Baret, F., Vanderbilt, V.C., Steven, M.D., et Jacquemoud, S. 1994. Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*. 48:253-260.

- Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Biehl, L.L., et Stoner, E.R. 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. 38:2-44.
- Bégué, A. 1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques-Cas d'un couvert discontinu. Thèse de doctorat, Université Paris VII. 139p.
- Bégué, A., Prince, S.D., Hanan, N.P., et Roujean, J.L. 1996. Shortwave radiation budget of Sahelian vegetation. 2. radiative transfer models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79:97-112.
- Berry, J., et Björkman, O. 1980. Photosynthetic temperature response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*. 31:491-593.
- Biscoe, P.V., Gallagher, J.N.G. 1977. Weather, dry matter production and yield. *In* Environmental effects on crop physiology, J.J. Landsberg, C.V. Cutting (Eds), Academic Press, London. pp.75-100.
- Boiffin, J., Dürr, C., Fleury, A., Marin-Lafleche, A., et Maillet, I. 1992. Analysis of the variability of sugar beet (*Beta vulgaris* L) growth during the early stages. 1. Influence of various conditions on crop establishment. *Agronomie*. 12:515-525.
- Boiffin J., Dubrulle P., Dürr C., Richard G., 1994. Modelling sugarbeet seedling emergence and early growth, *Proceeding of 13th International Conference ISTRO*, Jensen H.E., Schonning P., Mikkelsen S.A, Madsen KB, Danish Institute of Plant and Soil Science, Aalborg(DK), pp.1143-1148
- Bonhomme, R., Drouet, J.-L., et Améglio, T. 1995. Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. *In* Actes de l'école-chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril, 1995, Editions INRA, Paris. Tome 1. pp.647-667.
- Bouman, B.A.M. 1991. Linking X-band radar backscattering and optical reflectance with crop growth models. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands. 169p.
- Bouman, B.A.M. 1991. The linking of crop growth models and multi-sensor remote sensing data. *Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France. pp.583-588
- Bouman, B.A.M., et Goudriaan, J. 1990. Linking crop growth models and remote sensing data. *Proceedings of the 1st Congress of the European Society of Agronomy*. Paris 5-7, 1990. 2P26.
- Bouman, B.A.M, van Kasteren, H.W.J., et Uenk, D. 1993. Standard relations to estimate ground cover and LAI of agricultural crops from reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*. 1(4):249-262.
- Brisson, N. *et al.* 1992. Compte rendu de l'expérimentation blé dur 1992; Note interne 92-2. 48p.
- Brisson, N., King, D., Nicoulaud, B., Ruget, F., Ripoche, D., et Darthout, R. 1992. A crop model for land suitability evaluation: a case study of maize crop in France. *European Journal of Agronomy*. 1(3):163-175.
- Brochery, F. 1996. Test d'un modèle de simulation de la croissance de la culture de betterave à sucre (SUCROS): Intérêt d'une amélioration de la prise en compte de la phase d'implantation dans la prévision de la croissance et du rendement. Mémoire DEA INA-PG. 31p.

- Buiten, H.J. 1993. General view of remote sensing as a source of information. *In* Land observation by remote sensing-Theory and applications. Current topics in remote sensing, H.J. Buiten and J.G.P.W. Clevers (Eds.), Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam. pp.9-26.
- Bunnik, N.J.J. 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties, H. Veenman en Zonen, Wageningen, The Netherlands. 175p.
- Carter, G.A. 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*. 15(3):697-703.
- Chandrasekhar, S. 1950. Radiative transfer, Oxford-Clarendon Press.
- Chartier, Ph., Morot-Gaudry J.F., Bethenod, O., et Thomas D.A., 1977. The net assimilation of C3 and C4 plants as influenced by light and carbon dioxide, and an analysis of the role of the gene opaque 2 in young maize. *In* Environmental Effects on crop physiology, J.J. Landsberg, C.V. Cutting (Editors). pp.125-136.
- Chartier, M., Bonchretien, P., Allirand, J.M., Gosse, G. 1989. Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700nm). *Agronomie*. 9: 281-284.
- Clevers, J.G.P.W. 1986. Application of remote sensing to agricultural field trials. Ph.D., thesis, Agricultural University Wageningen Papers. 227p.
- Clevers, J.G.P.W. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of LAI. *Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*. pp.215-220.
- Clevers, J.G.P.W. 1989. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimation leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment*. 29:25-37.
- Clevers, J.G.P.W., Verhoef, W. 1993. LAI estimation by means of the WDVl: a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model. *Remote Sensing Reviews*. 7:43-64.
- Clevers, J.G.P.W., et van Leeuwen, H.J.C. 1994. Combining directional and high spectral resolution information from optical remote sensing data for crop growth monitoring. *Proceedings of the Sixth International Symposium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France. pp.643-653.
- Clevers, J.G.P.W., van Leeuwen, H.J.C., et Verhoef, W. 1994. Estimating the fraction of APAR by means of vegetation indices:a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model. *Remote Sensing Reviews*. 9:203-220.
- Damay, N., et Le Gouis, J. 1993. Radiation use efficiency of sugar beet in Northern France. *European Journal of Agronomy*. 2(3):179-184.
- Daughtry, C.S.T., McMurtrey, J.E., Chappelle, E.W., Dulaney, W.P., Irons, J.R., et Satterwhite, M.B. 1995. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. *Agronomy Journal*. 87(2):165-171.

- Day, W. 1986. A simple model to describe variation between years in the early growth of sugar beet. *Field Crops Research*. 14:213-220.
- de Wit, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Publications, Report 663*, Purdoc, Wageningen. 57p.
- de Wit, C.T. 1982. Simulations of living systems. In *Simulation of plant growth and crop production*, F.W.T. Penning de Vries, H.H. van Laar (Eds), Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 308p.
- Dekervel, A. 1994. Mesures de photosynthèse sur couvert de betterave sucrière: Principe, mise en oeuvre et premiers résultats. Rapport de stage d'assistant ingénieur, ISA Lille. 22p.
- Delécolle, R., et Guérif, M. 1988. Introducing spectral data into a plant process model for improving its predicting ability. *Proceedings of the 4th International Colloquium on Signatures spectrales d'objets en télédétection*. Aussois Jan 18-22, 1988, France. pp.125-127.
- Delécolle, R., Mass, S.J., Guérif, M., et Baret, F. 1992. Remote sensing and crop production models: present trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 47:145-161.
- Droulin, J.F. 1995. Etudes des influences de l'azote sur la croissance de la Betterave Sucrière à l'aide d'un modèle simple d'efficacités. Possibilités d'utilisation de la télédétection comme outil de diagnostic du statut azoté de la culture. Mémoire de fin d'étude-ISA Beauvais. 52p.
- Dulk, J.A.den, 1989. The interpretation of remote sensing, a feasibility study, Ph.D.Thesis. Centre for Agrobiological Research (CABO), Wageningen, The Netherlands. 173p.
- Duntley, S.Q. 1942. The optical properties of diffusing materials. *Journal of the Optical Society of America*. 32(2):61-70.
- Dürr, C. 1994. Evolution des rendements et des techniques culturales dans le cas de la betterave sucrière. Document interne, INRA Laon.
- Dürr, C., Tamet, V., et Boiffin, J. 1990. Redistribution of seed reserves during the emergence of carrot seedlings and its influence on subsequent growth. *Proceedings of the 1st Congress of the European Society of Agronomy*. 1P43.
- Dürr, C., Boiffin, J., Fleury, A., et Coulomb, I. 1992. Analysis of the variability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth during the early stages. II. Factors influencing seedling size in field conditions. *Agronomie*. 12:527-535.
- Dürr, C., Elamrani, A., Gaudillere, J.P., et Souty, N. 1993. Analyse de la croissance de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) de la germination à l'apparition des premières feuilles. *Proceedings of the 56th Winter Congress*. pp.405-420.
- Dürr, C., et Boiffin, J. 1995. Sugarbeet seedling growth from germination to the first leaf stage. *Journal of Agricultural Science*. 124:427-435.
- Dürr, C., Durbrulle, P., Boiffin, J., Richard, G., et Duval, Y. 1995. Mise au point d'un modèle de simulation des levées de la betterave sucrière. Rôle des conditions d'implantation. 58^e congrès 19-22 juin 1995, Beaune, Institut International de Recherches Betteravières, Brussels. pp.425-431.

- Duval, Y., et Boiffin, J. 1990. Influence of soil crusting on the emergence of sugar beet seedlings. Proceedings of the 1st Congress of the European Society of Agronomy. Paris 5-7 Dec., 1990. 3P11.
- Eikenaar, G.J. 1993. Remote sensing and the checking of damage to urban trees. In Land observation by remote sensing - Theory and applications, H.J. Buiten, J.G.P.W. Clevers (Eds), Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam. 483-496.
- Ferré, F., et Fleury, A. 1994. Structure du peuplement, développement du couvert foliaire et efficacité d'interception. In Implantation de la betterave industrielle, J. Boiffin, E. Choppin de Janvry (Eds). 67:113-138.
- Fischer, A., Kergoat, L., et Mougin, E. 1994. Understanding the ecosystem dynamic behavior. What is the potential for satellite data assimilation into functional models? Mesures physiques et signatures en télédétection. pp.971-980.
- Gallagher, J.N., et Biscoe, P.V. 1978. Radiation absorption, growth, and yield of cereals. Journal of Agricultural Sciences of Cambridge. 91:47-60.
- Goel, N.S. 1988. Canopy reflectance models, their inversion, and estimation of canopy parameters. Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. C.N.R.S. Toulouse, août 1988. pp.729-740.
- Goel, N.S., et Deering, D.W. 1985. Evaluation of a canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. GE-23(5):674-684.
- Goel, N.S., et Grier, T. 1986. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies. I. Two-dimensional row canopy. International Journal of Remote Sensing. 7(5):665-681.
- Goel, N.S., et Strebel, D.E. 1984. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. Agronomy Journal. 76:800-803.
- Goel, N.S., et Thompson, R.L. 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. IV. total inversion of the SAIL model. Remote Sensing of Environment. 15:237-253.
- Goel, N.S., et Thompson, R.L. 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. estimation of leaf area index and average leaf angle using measured canopy reflectances. Remote Sensing of Environment. 16:69-85.
- Goel, N.S., et Grier, T. 1986. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data. II. Estimation of leaf area index and percentage of ground cover. International Journal of Remote Sensing. 7(10):1263-1286.
- Goel, N.S., et Grier, T. 1987. Estimation of canopy parameters of row planted vegetation using reflectance data for only four view directions. Remote Sensing of Environment. 21:37-51.
- Goel, N.S., et Grier, T. 1988. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data:III. TRIM:a model for radiative transfer in heterogeneous three-dimensional canopies. Remote Sensing of Environment. 25:255-293.

- Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorologie:simulation study. Ph.D. thesis; PUDOC, Wageningen. 247p.
- Goudriaan, J. 1982. Some techniques in dynamic simulation . *In* Simulation of plant growth and crop production. F.W.T. Penning de Vries, H.H. van Laar (Eds), Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. pp.66-84.
- Goudriaan, J. 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38:249-254.
- Goudriaan, J., van Laar, H.H. 1978. Calculation of daily totals of the gross CO₂ assimilation of leaf canopies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 26:373-382.
- Gu, X.F. 1991. Etalonnage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le site test de La Crau (appliqué aux images SPOT1-HRV, Landsat5-TM, NOAA11-AVHRR). Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII. 260p.
- Gu, X.F., Guyot. G. 1993. Effect of diffuse irradiance on the reflectance factor of reference panels under field conditions. *Remote Sensing of Environment*. 45:249-260.
- Guérif, M., Delécolle, R., Gu, X., Guinot, J.P., Jappiot, M., et Steinmetz, S. 1988. Estimation de la biomasse et du rendement de cultures de blé dur à partir des indices de végétation SPOT. *Proceedings of the 4th International Colloquium on spectral Signatures of Objects in Remote Sensing held at Aussois, France 18-22 Jan. 1988*. pp.137-141.
- Guérif, M., et Delécolle, R. 1993. Introducing remotely sensed estimates of canopy structure into plant models. *In* Crop structure and light microclimate-Characterisation and applications, C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet (Eds), INRA Editions, Paris. pp.479-490.
- Guérif, M., Duke, C., et Dürr, C. 1995. Estimation de la croissance et du rendement de la betterave sucrière: amélioration des performances d'un modèle de simulation par l'utilisation de données de télédétection. *Rôle des conditions d'implantation*. 58^e congrès, 19-22 juin 1995, Beaune, Institut International de Recherches Betteravières. pp.433-441.
- Guérif, M., Courault, D., et Brisson, N. 1996. Assimilation des données de télédétection dans les modèles de fonctionnement des cultures. *In* Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Le Croisic, Avril 1996, INRA Editions, Paris. Tome II (sous presse).
- Guyot, G. 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge, application à la télédétection. *Bulletin de Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*. 95:5-22.
- Guyot, G. 1989. Signatures spectrales des surfaces naturelles, *Télédétection satellitaire 5. Paradigme*, Caen. 178p.
- Hapke, B. 1977. Interpretation of optical observations of Mercury and the Moon. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 15:264-274.
- Hodánová, D. 1979. Sugar beet canopy photosynthesis as limited by leaf age and irradiance. Estimation by models. *Photosynthetica*. 13(4):376-385.

- Hodánová, D. 1981. Photosynthetic capacity, irradiance and sequential senescence of sugar beet leaves. *Biologia Plantarum*. 23(1):58-67.
- Horler, D.N.H., Dockray, M., et Barber, J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 4:273-288.
- Huete, A.R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25:295-309.
- Jacquemoud, S. 1992. Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux: Développement d'un modèle de réflectance spectrale, Thèse de Doctorat, Université de Paris VII. 93p.
- Jacquemoud, S., et Baret, F. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*. 34:75-91.
- Jacquemoud, S., Baret, F., et Hanocq, J.F. 1992. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 41:123-132.
- Jacquemoud, S., Flasse, S., Verdebout, J., et Schmuck, G. 1994. Comparison of several optimization methods to extract canopy biophysical parameters - applications to CAESAR data. Sixième symposium international sur l' mesures physiques et signatures en télédétection, 17-21 Jan., 1994. pp.291-298.
- Jaggard, K.W., et Clark, C.J.A. 1990. Remote sensing to predict the yield of sugar beet in England. In *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, M.D. Steven, J.A. Clark (Eds.), Butterworths. pp.201-206.
- Kanemasu, E.T., Asrar, G., et Fuchs, M. 1985. Application of remotely sensed data in wheat growth modelling. *Wheat Growth and Modelling. Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on Wheat Growth and Modelling, 1984, Bristol, UK*. 86. pp.357-369.
- Kauth, R.J., et Thomas, G.S. 1976. The Tasseled Cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, IN*. pp.41-51.
- Kimes, D.S., et Kirchner, J.A. 1982. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Applied Optics*. 21(22):4119-4129.
- Knipling, E.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing Environment*. 1:155-159.
- Kubelka, P., et Munk, F. 1931. Ein Beitrag zur Optik der Farbauftritte. *Annalen Technischer Physik*. 11:593-601.
- Kumar, M. 1988. Crop canopy spectral reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 9(2):285-294.
- Kumar, M., Monteith, J.L. 1981. Remote sensing of crop growth. *Plants and daylight spectrum*, H. Smith (Ed), Academic, New York. pp.133-144.

- Kuust, A. 1993. Simulation of crop reflectance (including hot spot effect). In *Crop structure and light microclimate-Characterization and applications*, C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet (Eds), INRA Editions, Paris. pp.263-270.
- Leblon, B., Guérif, M., et Baret, F. 1991. Spectral estimates of PAR interception and biomass production of irrigated rice crops. 1. model elaboration with ground data. *Remote Sensing of Environment*. 38:147-158.
- Leprieur, C., Verstraete, M.M., Pinty, B., et Chehbouni, A. 1994. NOAA/AVHRR Vegetation Indices: Suitability for monitoring fractional vegetation cover of the terrestrial biosphere. pp.1103-1110.
- Leroy, M. 1990. Modèle des systèmes de mesure imageurs optiques. Télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation, Centre National d'Etudes Spatiales, CEPADUES-Editions, Toulouse France, août 1988. pp.311-363.
- Lichtenthaler, H.K., Wellburn, A.R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 11:591-592.
- Lillesand, T.M., et Kiefer, R.W. 1987. Remote sensing and image interpretation, John Wiley and sons Edition. 721p.
- Long, S.P., Hallgren, J.E. 1985. Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory. In *Techniques in bioproductivity and photosynthesis*, 2nd ed., J. Coombs., D.O. Hall, S.P. Long, J.M.O. Scurlock (Eds), Pergamon Press, Oxford. pp.62-94.
- Lord, D., Desjardins, R.L., and Dubé, P.A. 1985. Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*. 18:113-123.
- Maas, S.J. 1988a. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecological Modelling*. 41:247-268.
- Maas, S.J. 1988b. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agronomy Journal*. 80:655-662.
- Maas, S., Delécolle, R., Guérif, M., et Baret, F. 1991. Incorporation of remotely sensed information into agricultural crop growth simulation models. *Proceedings 15th Symposium on Remote Sensing for Agriculture*, Bestville, 16 mai 1990. pp.18-40.
- Maas, S.J., Richardson, A.J., Wiegand, C.L., et Nixon, P.R. 1985. Use of plant, spectral and weather data in modeling corn growth. *Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, october 1985. pp.167-186.
- Machet, J.M., Guérif, M., Droulin, J.F. 1995. Détermination de la courbe de dilution de l'azote pour la culture de la betterave à sucre. 58^e Congrès, Beaune 19-22 juin 1995. *Institut International de Recherches Betteravières*, Brussels. pp.533-534.
- Major, D.J., Schaalje, G.B., Wiegand, C., et Bland, B.L. 1992. Accuracy and sensitivity analyses of SAIL model-predicted reflectance of maize. *Remote Sensing of Environment*. 41:61-70.

- Major, D.J., Smith, A.M., Hill, M.J., Willms, W.D., Brisco, B., et Brown, R.J. 1994. Radar backscatter and visible infrared reflectance from short-grass prairie. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 20(1):71-77.
- Milford, G.F., Biscoe, P.V., Jaggard, K.W., Scott, R.K., et Draycott, A.P. 1980. Physiological potential for increased yields of sugar beet. In *Opportunities for Increasing Crop Yield*. R.G. Hurd, P.V. Biscoe, C. Dennis (Eds.). London: Pitman. pp 71-83.
- Milford, G.F.J., Pocock, T.O., et Riley, J. 1985a. An analysis of leaf growth in sugar beet. I. Leaf appearance and expansion in relation to temperature under controlled conditions. *Annals of Applied Biology*. 106:163-172.
- Milford, G.F.J., Pocock, T.O., Riley, J., et Messem, A.B. 1985b. An analysis of leaf growth in sugar beet. III. Leaf expansion in field crops. *Annals of Applied Biology*. 106:187-203.
- Molenaar, M. 1993. Land observation by remote sensing - Theory and applications. In *Current topics in remote sensing*, H.J. Buiten J.G.P.W. Clevers (Eds), Gordon and Breach science publishers. pp.27-41.
- Monteith, J.L. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. In *Physiological aspect of crop yield*. J.D. Eastin, F.A.Haskins, C.Y.Sullivan, C.H.M.van Bavel (Editors), American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp.99-111.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B(281) pp.747-766.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britan. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B(281). pp.277-294.
- Moulin, S. 1995. Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse. 265p.
- Moulin, S., Fischer, A., et Delécolle, R. 1994. Assimilation of satellite measurements in short wavelengths into production model. Test of several radiative transfer models. Sixième Symposium International, Mesures physique et signatures en télédétection. pp.1127-1134.
- Moulin, S., Fischer, A., et Dedieu, G. 1995a. Assimilation of short wavelength remote sensing observations within a crop model: methodolgcial development and interannual field scale study. Satellite Meeting of the 10th International Congress of Photosynthesis, 20-30 August, Montpellier, France, ISPRS. pp.333-338.
- Moulin, S., Fischer, A., Dedieu, G., et Delécolle, R. 1995. Temporal variations in satellite reflectances at field and regional scales compared with values simulated by linking crop growth and SAIL models. *Remote Sensing of Environment*. 54:261-272.
- Myneni, R.B., Asrar, G., Burnett, R.B., et Kanemasu, E.T. 1987. Radiative transfer in an anisotropically scattering vegetative medium. *Agricultural and Forest Meteorology*. 41:97-121.
- Myneni, R.B., Ross, J., et Asrar, G. 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 45(1/2):1-151.

- Nelder, J.A., et Mead, R. 1965. A simple methode for function minimization. *The Computer Journal*. 7:308-313.
- Norman, J.M., Arkebauer, T.J. 1991. Predicting canopy light-use efficiency from leaf characteristics. In *Modeling Plant and Soil Systems*, J. Hanks , J.T. Ritchie (Eds), ASA,CSSA,SSSA, Madison, Wisconsin, USA. pp.125-143.
- Otterman, J. 1984. Albedo of a forest modeled as a plane with dense protrusions. *Journal of climate and applied meterology*. 23:297-307.
- 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 Grassland, Colorado. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, MI. pp.1357-1381.
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., et Field, C.B. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*. 48:135-146.
- Pinty, B., Verstraete, M.M., et Dickinson, R.E. 1989. A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils. *Remote Sensing of Environment*. 27:273-288.
- Pinty, B., et Verstraete, M.M. 1992. GEMI:a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*. 101:15-20.
- Porter, J.R. 1993. AFRCWHEAT2:A model of growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *European Journal of Agronomy*. 2:69-92.
- Press, W.H. et Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. 1992. *Numerical recipies in C:the art of scientific computing*, 2nd ed., Cambridge University Press. pp.994.
- Price, W.L. 1979. A controlled random search procedure for global optimisation. *The Computer Journal*. 20:367-370.
- Privette, J.L., Myenni, R.B., Tucker, C.J., et Emery, W.J. 1994. Invertibility of a 1-D discrete ordinates canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*. 48:89-105.
- Rabbinge, R. et Bastiaans, 1989. Combination models, crop growth and pest and diseases. In *Simulation and system management in crop protection*. R. Rabbinge, S.A. Ward , H.H. van Laar (Eds) *Simulation Monographs*, Purdoc, Wageningen. pp.217-239.
- Rappoldt C. et van Kraalingen DWG, 1990. Reference manual of the FORTRAN utility library TTUTIL with applications. *Simulation Report CCBO-TT no.20*, CABO-DLO et Agricultural University, Wageningen. 122p.
- Renders, J.M., et Flasse, S.P. 1996. Hybrid methods using genetic algorithms for global optimization. *IEEE Trans. Systems Man and cybernetics*. 26(2):243-258.
- Richardson, A.J., Wiegand, C.L., Gausman, H.W., Cuellar, J.A., et Gerbermann, A.H. 1975. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 41:1401-1407.

- Richardson, A.J., et Wiegand, C.L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43:1541-1552.
- Richardson, A.J., et Wiegand, C.L. 1990. Comparison of two models for simulation the soil-vegetation composite reflectance of a developing cotton canopy. *International Journal of Remote Sensing*. 11(3):447-459.
- Ritchie, J.T., 1991. Wheat phasic development. *In* Modeling plant and soil systems, R.J. Hanks, J.T. Ritchie (Eds), American Society of Agronomy. pp.31-54.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., et Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. 371p.
- Ruget, F. 1981. Respiration de croissance et respiration d'entretiens:méthodes de mesure, comparision des résultats. *Agronomie*.1(7):601-610.
- Scott, R.K., Harper, F., Wood, D.W., et Jaggard, K.W. 1974. Effects of seed size on growth, development, and yield of monogerm sugar beet. *Journal of Agricultural Sciences of Cambridge*. 82:517-530.
- Scott, R.K., et Jaggard, K.W. 1978. Theoretical crieria for maximum yield. *Proceedings of the 41st winter congress*. pp.179-198.
- Scott, R.K., et Jaggard, K.W. 1992. Crop growth and weather:can yield forecasts be reliable?. *proceedings of the 55th congress*. pp.169-187.
- Scott, R.K., et Jaggard, K.W. 1993. An analysis of the efficiency of the sugar beet crop in exploiting the environment. *In* Sugar Beet and its Environment. pp.37-56.
- Sinoquet, H., Olioso, A., Guyon, D., et Zurfluh, O. 1995. Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire:Modèles "classiques". *In* Actes de l'école-checheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril, 1995, Editions INRA. 1:333-350.
- Soltner, D. 1980. Les grandes productions végétales - Céréales, plantes sarclées, prairie. 11e édition Collection Sciences et Techniques Agricoles. pp186.
- Spitters, C.J.T. 1986.Separation the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38:231-242.
- Spitters, C.J.T. et Kramer, Th. 1986. Differences between spring wheat cultivars in early growth. *Euphytica*. 35:273-292.
- Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M., et Goudriaan, J. 1986. Separation the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part 1. components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38:217-229.
- Spitters, C.J.T., van Keulen H., van Kraalingen D.W.D. 1989. A simple and universal crop growth simulator:SUCROS87. *In* Simulation and system management in crop protection. R. Rabbinge, S.A. Ward , H.H. van Laar (Eds) Simulation Monographs, Purdoc, Wageningen. pp.147-181.

- Statistical Sciences. 1993. S-PLUS user's manual, version 3.2. Seattle: StatSci, a division of MathSoft, Inc.
- Stol, W., Rouse, D.I., van Kraalingen, D.W.G., et Klepper, O., 1992. FSEOPT a FORTRAN program for calibration and uncertainty analysis of simulation models. Simulation Report CABO-TT, no. 24, CABO-DLO and Agricultural University, Wageningen. 24p.
- Stoner, E.R., et Baumgardner, M.F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal. 45:1161-1165.
- Suits, G.H. 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. Remote Sensing of Environment. 2:117-125.
- Swaney, D.P., Jones, J.W., Mishoe, J.W., et Baker, F. 1986. A combined simulation-optimisation approach for predicting crop yield. Agricultural Systems. 20:133-157.
- van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H., et Rappoldt, C. 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. Soil Use and Management. 5(1):16-24.
- van Keulen, 1982. Crop production under semi-arid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability. In Simulation of plant growth and crop production, F.W.T. Penning de Vries, H.H. van Laar (Eds), Simulation Monographs, PURDOC, Wageningen. pp.234-249.
- van Kraalingen, D.W.G. 1991. The FSE system for crop simulation. Simulation Report CCBO-TT. 23:77p.
- van Laar, H.H., Goudriaan, J., van Keulen, H. 1992. Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations (as applied to spring wheat), Simulations Reports, CABO-DLO. 27:76p
- van Leeuwen, H.J.C. 1996. Methodology for combining optical and microwave remote sensing in agricultural crop monitoring-the sugar beet crop as special case, Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University, The Netherlands. 233p.
- van Leeuwen, H.J.C., et Clevers, J.G.P.W., 1994. Synergy between optical and microwave remote sensing for crop growth monitoring. Sixième Symposium International - Mesures physiques et signatures en télédétection, ISPRS, 17-21 janvier 1994, Val d'Isère-France. pp.1175-1182.
- Vandendriessche, H.J., et van Ittersum, M.K. 1995. Crop models and decision support systems for yield forecasting and management of the sugar beet crop. European Journal of Agronomy. 4(3):269-279.
- Vanderbilt, V.C., Kollenkark, J.C., Biehl, L.L., Robinson, B.F., Bauer, M.E., et Ranson, K.J. 1981. Diurnal changes in reflectance factor due to sun-row direction interactions. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon 8-11 sept., 1981, G.III.1:499-508.
- Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., et Artis, P. 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Acta OEcologica/OEcologia Plantarum. 3(17):3-26.
- Varlet-Grancher, C., Grosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R., et Allirand, J.M. 1989. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. Agronomie. 9:419-439.

- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*. 16:125-141.
- Verhoef, W. 1985. Earth observation modeling based on layered scattering matrices. *Remote Sensing of Environment*. 17:165-178.
- Verhoef, W., et Bunnik, N.J.J. 1981. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. *Signatures Spectrales d'objets en télédétection*, Avignon, 8-11 sept. 1981, G.II.4.:273-290.
- Versteeg, M.N., van Keulen, H. 1986. Potential crop production prediction by some simple calculation methods, as compared with computer simulations. *Agricultural Systems*. 19:249-272.
- Verstraete, M.M., Pinty, B., et Dickinson, R.E. 1990. A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. I. Theory. *Journal of Geophysical Research*. 95(D8):11755-11765.
- Volgelmann, T.C., J.F. Bornman, et S. Jossierand. 1989. Photosynthetic gradients and spectral regime within leaves of *Medicago sativa*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B323:411-421.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R., et Rayner, J.H. 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science of Cambridge*. 102:371-382.
- Wilkerson, G.G., Jones, J.W., Boote, K.J., Ingram, K.T., et Mishoe, J.W. 1983. Modeling soybean growth for crop management. *Transactions of the ASAE*. 26:63-73.

Listes des tableaux et des figures

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Modèles mécanistes pour la betterave sucrière	8
Tableau 2-2. Jeux de paramètres correspondant à différentes qualités d'implantation.....	14
Tableau 3-1. Caractéristiques spectrales des réflectancemètres.....	42
Tableau 3-2. Paramètres du polynôme de Legendre de la réflectance bidirectionnelle du panneau	43
Tableau 3-3. Résultats des ajustements de $g(\theta_S)$ et de la détermination de α	45
Tableau 3-4. Résultats de l'inter-étalonnage du réflectancemètre 5bandes avec le réflectancemètre 3 bandes	46
Tableau 3-5. Configuration générale des jours des mesures de photosynthèse nette.....	49
Tableau 3-6. Caractérisation des lits de semences	51
Tableau 3-7. Récapitulation des interventions sur la culture teste	52
Tableau 3-7. Sommaires des interventions sur la culture test.....	52
Tableau 3-8. Types de sol des sites de Epeville et Marle, avec les paramètres des droites du sol (Rouge-PIR) avec ou sans binage	57
Tableau 3-9. Coefficients des relations réflectance-humidité pour les différents types de sol et les 3 bandes spectrales	58
Tableau 4-1. Paramètres d'implantation utilisés dans les analyses de sensibilité de SUCROS	67
Tableau 4-2. Coefficients modifiés par l'étalonnage de SUCROS sur l'expérimentation Mons94.....	78
Tableau 4-3 Paramètres d'entrée de SAIL.....	80
Tableau 4-4. Paramètres de SAIL utilisés pour l'inversion sur les mesures de la réflectance	84
Tableau 5-1. Description des classes d'humidité et de rugosité considérées	88
Tableau 5-2. Paramètres des courbes caractéristiques réflectance-humidité pour les différentes classes de rugosité.....	88
Tableau 5-3. Caractéristiques des paramètres végétation	89
Tableau 5-4. Valeurs des paramètres "standard" de SAIL pour les deux options et paramètres de configuration utilisés pour les simulations	91

Tableau 6-1. Bornes de la gamme autorisée pour les paramètres d'implantation à ré-étalonner	105
Tableau 6-2. Estimation de LAI dans les situations expérimentales pour les cultures d'étalonnage et de test, et erreur moyenne relative d'estimation du LAI précoce	106
Tableau 6-3. Paramètres utilisés pour décrire les 3 types d'implantation.....	113
Tableau 6-4. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé	117
Tableau 6-5. Résultats des 250 processus d'assimilation des données d'indices de végétation dans le modèle couplé	119
Tableau 6-6. Niveaux de LAI atteints aux différentes dates d'acquisition par les 9 situations d'implantation.....	120
Tableau 6-7. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI, option 2 dans le modèle couplé	122

Liste des figures

Figure 2-1. Schéma général des modèles de simulation des cultures	5
Figure 2-2. Evolution morphologique de la betterave	6
Figure 2-3. Rendement de la betterave sucrière en fonction de la quantité de rayonnement intercepté	10
Figure 2-4. Evolution du rayonnement solaire disponible et du rayonnement intercepté	10
Figure 2-5. Taux de levée final en fonction de la somme de température nécessaire à levée	11
Figure 2-6. Taille des plantules en fonction de la somme de température nécessaire à levée	11
Figure 2-7. Taux relatif de croissance des plantules en fonction de la somme de température nécessaire à levée	11
Figure 2-8. Simulations de la croissance et du rendements de la betterave avec le modèle SUCROS pour différents qualités d'implantation	14
Figure 2-9. Schema simple du fonctionnement du modèle SUCROS	15
Figure 2-10. Le concept de réflectance bidirectionnelle	17
Figure 2-11. Indicatrice de luminance d'une surface labbertienne et d'une sufrace naturelle	18
Figure 2-12. Variation du facteur de réflectance d'un couvert de soja avec l'angle azimutal du soleil ..	19
Figure 2-13. Réflectance, absorptance et transmittance d'une feuille verte vigoureuse en fonction de la longueur d'onde	19
Figure 2-14. Variation de la réflectance d'une feuille due au stress causé par le gaz ozone	20
Figure 2-15. Variation de la réflectance de 3 types de sols avec la longueur d'onde	21
Figure 2-16. Variation de la réflectance avec la longueur d'onde pour différentes textures de sol	21
Figure 2-17. Variation du spectre de réflectance d'un sol en fonction de son humidité	21
Figure 2-18. Illustration du concept des droite des sols pour un sol particulier	22
Figure 2-19. Atténuation du PAR en fonction de la profondeur dans le couvert pour un couvert homogène	23
Figure 2-20. Les flux incident et sortant de SAIL dans une couche isolée	26
Figure 2-21. Assimilation de données de télédétection dans le modèle de culture	27
Figure 2-22. Forçage d'un modèle de culture par des estimations de l'efficience d'interception du rayonnement	28
Figure 2-23. Correction d'une modèle par re-étalonnage, démarche descendante	30
Figure 2-24. Correction d'une modèle par re-étalonnage, sens direct	30
Figure 2-25. Biomasse aérienne de la culture de betterave et indice WdVI estimés en fin du processus de re-étalonnage comparés aux simulations standard et aux mesures	31
Figure 2-26. Organigramme de résolution du problème d'inversion. Cas d'un modèle de réflectance ..	32

Figure 3-1. Plan du dispositif expérimental.....	36
Figure 3-2. Évolution A) des flux de rayonnement RG et PAR incidents, et B) des températures de l'air maximum et minimum et de la pluviométrie	37
Figure 3-3. Évolution de la réserve d'eau totale du sol, 0-200cm.....	37
Figure 3-4. Taux de la levée en pour-cent de la taux de levée finale, culture d'étalonnage.....	38
Figure 3-5. Les organes de la betterave	38
Figure 3-6. Masses sèches des organes mesurés plus et moins les écarts types des 6 blocs de la culture d'étalonnage	39
Figure 3-7. LAI des 6 blocs de la culture d'étalonnage des modèles	40
Figure 3-8. Mesures de rapport surface-masse des limbes (SLA) en fonction du numéro d'apparition des feuilles.....	40
Figure 3-9. Mesures pour le bilan radiatif dans le PAR. A) Les flux de PAR (réfléchi, transmis, absorbé) B) Evolution de l'efficacité d'absorption du PAR en fonction du LAI.....	41
Figure 3-10. Configuration des deux réflectancemètres CIMEL 3bandes et 5bandes	42
Figure 3-11. Évolution de la réflectance du panneau de Spectralon selon l'angle zénithal solaire θ_S ..	44
Figure 3-12. Évolution de $g(\theta_S)$ en fonction de $\cos(\theta_S)$ pour le radiomètre 3bandes CIMEL	45
Figure 3-13. Evolution du rapport r_{5b}/r_{3b} entre les deux réflectancemètres CIMEL en fonction de la réflectance du panneau de référence.....	46
Figure 3-14. Réflectance de la culture en fonction de LAI	47
Figure 3-15. Relation humidité de la surface-réflectance du sol.....	47
Figure 3-16. Système de mesure de la photosynthèse nette au niveau du couvert.....	48
Figure 3-17. Évolution de la teneur en CO_2 dans l'enceinte et calcul des flux de photosynthèse et respiration	49
Figure 3-18. Comparaison des température pour les 4 jours de mesures de la photosynthèse: dans l'enceinte, sur végétation, ou sol nu; à l'extérieur, à 2m au dessus du couvert, et) 20cm dans le couvert.....	50
Figure 3-19. PAR incident mesuré à l'extérieur de l'enceinte et moments des mesures de la photosynthèse	50
Figure 3-20. Photosynthèse brute estimée pour 2 jours de mesure, en introduisant la respiration des plantes et du sol, en fonction du PAR incident et de la température instantanée à 2m	51
Figure 3-21. Cinétiques de levée des cultures étalonnage et test en fonction de la somme de température depuis le semis.....	53
Figure 3-22. Évolution du LAI de la culture teste. Comparaison du LAI de la culture d'étalonnage	54
Figure 3-23. Masses des différents organes de la culture test.....	54
Figure 3-24. Mesures de la réflectance rouge et proche infrarouge de la culture test. Comparaison avec celles réalisées sur la culture d'étalonnage	54
Figure 3-25. Les deux sites d'études autour des sucreries de Epeville et Marle.....	56
Figure 3-26. Les paramètres des droites des sols en fonction des types de sol et de la rugosité	57
Figure 3-27. Relations réflectance du sol-humidité de surface pour 3 types de sols et 2 états de rugosité, dans les 3 bandes spectrales.	58

Figure 3-28. Évolution du LAI des six traitements azotés. Clermont-les-Fermes, 1994.....	59
Figure 3-29. Évolution de la chlorophylle des six traitements azotés, Clermont-les-Fermes, 1994. Relation teneur en chlorophylles - teneur en azote des limbes.....	59
Figure 3-30. Évolution des propriétés optiques (réflectance et transmittance) des feuilles en fonction du niveau de LAI. Clermont-les-Fermes, 1994.....	60
Figure 3-31. Évolution des angles foliaires-obtenus par inversion du modèle SAIL sur des données de réflectances de couvert mesurées-en fonction du temps et du niveau de fertilisation	60
Figure 4-1. Schéma des principales phases de la croissance de la betterave dans le modèle SUCROS	61
Figure 4-2. Représentation schématique des fonctions de SUCROS	62
Figure 4-3. Les fonctions de répartition des assimilats dans SUCROS, en fonction de la somme de température (base 2°C) depuis la levée	63
Figure 4-4. Schéma de la modélisation de l'absorption de rayonnement et de la photosynthèse brute dans SUCROS.....	63
Figure 4-5. Les facteurs de réduction du taux de photosynthèse maximum	64
Figure 4-6. Mention des principaux paramètres de SUCROS qui ont été utilisés dans l'analyse de sensibilité.....	65
Figure 4-7. Sensibilité de SUCROS au paramètre SEMERG.....	67
Figure 4-8. Sensibilité de SUCROS aux paramètres NPL et LA0	68
Figure 4-9. Sensibilité de SUCROS aux paramètres de d'implantation: quatre types d'implantation....	69
Figure 4-10. Sensibilité de SUCROS au paramètre KDIF	70
Figure 4-11. Sensibilité de SUCROS au paramètre EFF.....	71
Figure 4-12. Sensibilité de SUCROS au paramètre AMX.....	71
Figure 4-13. Sensibilité de SUCROS au paramètre SLA.....	71
Figure 4-14. Comparaison du PAR absorbé mesuré et simulé (paramètres par défaut)	73
Figure 4-15. Valeurs estimées de paramètre d'agrégation des feuilles, CLUSTF, à partir des mesures de PAR absorbé en fonction du LAI et ajustement par une fonction exponentielle.....	73
Figure 4-16. Comparaison de PAR absorbé mesuré et simulé après l'ajustement de CLUSTF	73
Figure 4-17. Schéma de la répartition des assimilats dans SUCROS.....	74
Figure 4-18. Coefficients de répartition des assimilats vers les organes aériens.....	74
Figure 4-19. Nouvelle fonction de répartition des assimilats vers les organes aériens.....	74
Figure 4-20. Photosynthèse brute mesurée et simulée en fonction du PAR incident et de la température instantanée à 2m. Jours 175 et 216.....	75
Figure 4-21. Ajustement du facteur de réduction du AMX par la température et fréquence d'occurrence des températures diurnes pendant la saison.....	76
Figure 4-22. Evaluation de l'étalonnage partiel de SUCROS (biomasse totale) avant l'étalonnage des paramètres AMX et EFF	76
Figure 4-23. Modification du facteur de réduction du AMX à partir des mesures de biomasse totale...	76

Figure 4-24. Modification de l'efficience initiale EFF	77
Figure 4-25 Résultats de l'étalonnage complet de SUCROS: comparaison des valeurs simulées et mesurées	78
Figure 4-26 Evaluation de l'étalonnage complete de SUCROS sur la parcelle test	78
Figure 4-27. Réflectance bidirectionnelle (rouge et proche infrarouge) simulée par SAIL en fonction du LAI et de l'angle zénithal (θ_0) d'observation	81
Figure 4-28. Idem Figure 4-27 mais LAI=2.0 et on fait varier l'angle moyen θ_L de la fonction de distribution des inclinaisons foliaires.....	81
Figure 4-29. Réflectance bidirectionnelle du couvert en fonction de la réflectance d'une feuille simulée par SAIL pour les différents LAI.....	82
Figure 4-30. Réflectance bidirectionnelle du couvert simulée par SAIL en fonction de la réflectance du sol pour les différents LAI	82
Figure 4-31. Réflectance bidirectionnelle du couvert verte et proche infrarouge simulée par SAIL en fonction de θ_0 et θ_S	83
Figure 4-32. Etalonnage de SAIL: estimation de l'évolution du paramètre θ_L	84
Figure 4-33. Simulation des réflectance par les modèles couplés pour les deux cultures	85
Figure 5-1. Statut des parametres de SUCROS et SAIL dans le modèle couplé utilisé pour l'assimilation des mesures de réflectance	86
Figure 5-2. Réflectances Rouge et PIR "standard" simulées avec les options 1 et 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL	93
Figure 5-3. Histogrammes des réflectances de sol, par classe d'humidité.....	94
Figure 5-4. Réflectances de couvert Rouge et PIR en fonction du LAI pour différentes classes d'humidités des sols	95
Figure 5-5. Erreurs relatives moyennes sur les réflectances dans les 3 bandes selon les options utilisées pour la réflectance "standard".....	95
Figure 5-6. Erreurs absolues sur la détermination de la réflectance rouge et PIR avec les paramètres de l'option 1 selon la classe d'humidité du sol.....	96
Figure 5-7. Erreurs absolues sur la détermination de la réflectance rouge et PIR avec les paramètres de l'option 2 selon la classe d'humidité du sol.....	97
Figure 5-8. Erreurs relatives moyennes sur les réflectances dans les 3 bandes selon les options utilisées pour la réflectance standard	97
Figure 5-9. Erreurs relatives moyennes sur les indices de végétation (NDVI, WdVI, TSAVI, GEMI) ...	98
Figure 5-10. Relations indices de végétation-LAI pour les différents indices (NDVI, WdVI, TSAVI, GEMI), différents types de sol sec.....	99

Figure 6-1. Distributions de données bruitées créées autour des mesures pour les deux cultures étalonnage et test.....	104
Figure 6-2 Surfaces de réponse du critère RMSE à la variation des paramètres SEMERG et LAII pour les 2 cultures. Cas de 2 paramètres à estimer.....	106
Figure 6-3 Distribution des valeurs des paramètres pour les 500 inversions sur les données de LAI bruitées. Cas de 2 paramètres à estimer.....	107
Figure 6-4. Relations entre paramètres estimés dans les 2 situations étalonnage et test. Cas de 2 paramètres à estimer.....	107
Figure 6-5 Distribution des erreurs moyennes (RMSE) sur le LAI pour les 2 situations étalonnage et test. Cas de 2 paramètres à estimer.....	108
Figure 6-6. Surfaces de réponse du critère RMSE à la variation des paramètres DAYSOW, SEMERG, LAII pour les 2 cultures. Cas de 3 paramètres à estimer.....	108
Figure 6-7. Distribution des valeurs des paramètres pour les 500 inversions sur les données de LAI bruitées.....	109
Figure 6-8. Distribution des erreurs moyennes (RMSE) sur le LAI pour les 2 situations étalonnage et test. Cas de 3 paramètres à estimer.....	109
Figure 6-9. Résultats de l'assimilation des réflectances de la culture test sur l'estimation de les réflectances, le LAI; les paramètres SEMERG et LAII et le rendement.....	110
Figure 6-10. Position des courbes d'évolution du LAI des différentes situations d'implantation par rapport aux dates des mesures.....	113
Figure 6-11. Schéma de création des données des situations simulées.....	113
Figure 6-12. Erreurs absolues sur la détermination des réflectances dans le PIR.....	115
Figure 6-13. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 1 pour l'estimation des paramètres de SAIL.....	116
Figure 6-14. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL.....	117
Figure 6-15. Schéma du processus d'assimilation des données de réflectance par le modèle couplé SUCROS+SAIL.....	116
Figure 6-16 Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 1 pour l'estimation des paramètres de SAIL, sol LA humide.....	118
Figure 6-17. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de réflectance dans le modèle couplé avec l'option 2 pour l'estimation des paramètres de SAIL, sol LA humide.....	119
Figure 6-18. Erreurs absolues sur la détermination de NDVI et TSAVI avec option 1 et option 2.....	120
Figure 6-19. Erreurs absolues sur la détermination de TSAVI avec l'option 2.....	121
Figure 6-20. Résultats des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI dans le modèle couplé avec l'option 2.....	121
Figure 6-21. Erreurs absolues produites sur les TSAVI aux différentes dates pour les différentes implantations.....	122
Figure 6-22. Relation TSAVI-LAI, obtenue pour des LAI de 0.05 à 6.0, avec SAIL, option 2.....	122
Figure 6-23. LAI estimés à la fin des 250 processus d'assimilation des données de TSAVI dans le modèle couplé avec l'option 2 pour les 9 différentes situations d'implantation.....	123