



HAL
open science

Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture

Sophie Moulin

► **To cite this version:**

Sophie Moulin. Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 1995. Français. NNT: . tel-02851020

HAL Id: tel-02851020

<https://hal.inrae.fr/tel-02851020v1>

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.

THESE

N° d'ordre : 2219

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Ecole doctorale : Sciences de l'Univers

Discipline : Astrophysique, Géophysique et Techniques Spatiales

Spécialité : **Téledétection Spatiale**

par

Sophie MOULIN

**Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs
d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture**

Soutenue le 18 décembre 1995 à Toulouse

devant le jury composé de :

MM.

D. VIGNES	Professeur, CESBIO/UPS Toulouse	Président
B. SAUGIER	Professeur, LEV/Université Paris-Sud	Rapporteur
D. VIDAL-MADJAR	Directeur de recherche, CETP Vélizy	Rapporteur
B. SEGUIN	Directeur de recherche, INRA Avignon	Directeur de Thèse
A. FISCHER	Chargé de recherche, CESBIO/PIK Potsdam	Examineur
R. DELECOLLE	Directeur de recherche, INRA Avignon	Examineur
T. PHULPIN	Ingénieur, CNES Toulouse	Examineur

Sophie MOULIN

18 décembre 1995, Toulouse, France

Spécialité du doctorat: Sciences de l'Univers

Titre:

Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture

Mots clés:

Observations satellitaires, Assimilation, Modèles de fonctionnement et de réflectance

Résumé:

Cette étude concerne la synergie entre modèles de fonctionnement de la végétation et observations satellitaires, et plus précisément l'intégration d'observations satellitaires dans un modèle agrométéorologique, dans le but d'estimer la production du couvert végétal des zones de grandes cultures tempérées.

A l'échelle de la parcelle, pour des conditions données (date semis/variété/climat), le couplage d'un modèle de fonctionnement et d'un modèle de réflectances reproduit l'évolution temporelle du signal radiométrique satellitaire haute résolution spatiale SPOT HRV. Les réflectances prédites pour diverses parcelles ont été comparées aux réflectances télédéteectées au cours de deux saisons culturales. Le modèle de fonctionnement permet également d'estimer la production en terme de rendement et de production primaire nette.

Dans un second temps, les observations radiométriques sont utilisées pour contraindre le modèle, selon la technique 'd'assimilation'. Dans des conditions favorables, c'est à dire lorsque le profil radiométrique est correctement reproduit et qu'au moins une observation est disponible au début de la croissance du couvert, l'assimilation d'observations SPOT HRV conduit à des résultats satisfaisants. Une condition initiale, comme la date de semis, peut ainsi être retrouvée avec une précision suffisante. Des tests d'assimilation d'observations synthétiques ont montré l'importance de la fréquence et du calendrier des observations. On note en particulier que les observations acquises en début de croissance sont les plus pertinentes.

Dans un troisième temps, la simulation du profil radiométrique a été effectuée à l'échelle régionale. Le décalage inter-annuel obtenu sur les simulations (recomposition du signal radiométrique des parcelles de blé d'hiver de la région) est cohérent avec le décalage observé sur les données SPOT HRV. Toutefois, une carte d'occupation du sol est indispensable à l'utilisation d'observations SPOT HRV, données qui ne sont disponibles que pour quelques dates au cours d'une saison de croissance. Des observations basse résolution spatiale, de fréquence plus élevée, ont alors été simulées. Le profil temporel radiométrique observé par le capteur NOAA AVHRR a été grossièrement reproduit (simulation mécaniste pour la culture dominante et empirique pour les composantes minoritaires).

Ces résultats sont des éléments encourageants concernant la pertinence d'une synergie entre des modèles de fonctionnement et des observations satellitaires, dans le but d'estimer la production d'un couvert végétal. La stratégie d'assimilation de données satellitaires permet l'ajustement de paramètres nécessaires à une modélisation fiable. A l'avenir, il semble envisageable d'appliquer le concept 'd'assimilation' à l'échelle régionale, où aucune information terrain n'est disponible, en combinant les informations télédéteectées à haute et basse résolutions spatiales.

Sophie MOULIN

December 18, 1995, Toulouse, France

Doctorate speciality: Universe Sciences

Title:

Assimilation of short wavelength satellite observations into an agrometeorological model

Key words:

Satellite observations, Assimilation, Agrometeorological and reflectance models

Abstract:

The synergy of agrometeorological models and short wavelength satellite observations allows the consistency of the modelling of some remotely sensed variables' time profiles to be controlled. Satellite observations are also used to constrain the crop model which predicts the canopy productivity. The study was performed over a controlled area.

For given environmental and cultural conditions, the time profile of high spatial resolution satellite signal (SPOT HRV) was predicted at field scale through the link between a crop model and a canopy radiative transfer model. The interannual variations of the measured radiometric signal, due to known parameters variations, were reproduced. The impact of such parameters variations is significant for the estimation of canopy productivity.

The use of SPOT HRV observations to constrain the modelling implies that the signal is well simulated. Synthetic observations allows testing of the assimilation technique for many acquisition configurations. The quality of the productivity estimation depends on the quality of the inverted parameter adjustment. The merit function feature is very sensitive to the number and to the position of observations among the seasonal cycle.

The low spatial resolution radiometric signal (NOAA AVHRR) was simulated at regional scale. The different components of the observed signal were obtained either with the crop model, or empirically. The rebuilding was performed with the land use classification.

The linked crop/reflectance models are able to predict high and coarse spatial resolution radiometric signals. The quality of the adjustment performed by assimilating satellite observations strongly depends on the quality of the modelling performed in the direct way. An improvement is needed for the signal modelling during the growth period.

INTRODUCTION	9
CHAPITRE I - SYNERGIE MESURES SATELLITAIRES - MODELES DE FONCTIONNEMENT : PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	19
I-1. TELEDETECTION DE LA VEGETATION	21
I-2. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES	23
I-2.1. Productivité et observations satellitaires	23
I-2.2. La stratégie de l'inversion	27
I-2.3. Le signal basse résolution spatiale	33
I-3. DEMARCHE PROPOSEE	35
I-3.1. Schéma général	35
I-3.2. Modèles et mesures	37
I-3.3. Les techniques de couplage modèles/observations satellitaires	41
CHAPITRE II - PRESENTATION DES DONNEES ET DES MODELES	47
II-1. DONNEES ET MODELES UTILISES	49
II-1.1. Le site de la Beauce	49
II-1.2. Le site de la Camargue	57
II-1.3. Le modèle de croissance de culture AFRCWHEAT2	61
II-1.4. Les modèles de réflectance	63
II-1.5. Les indices de végétation	66
II-2. SENSIBILITE DES 3 COMPOSANTES	67
II-2.1. Modèle de fonctionnement	67
II-2.2. Modèle de transfert radiatif dans le couvert	69
II-2.3. Modèle de corrections atmosphériques	84
II-3. CONCLUSION	87
CHAPITRE III - SIMULATION EN MODE DIRECT - HAUTE RESOLUTION SPATIALE	89
III-1. INTRODUCTION	91
III-2. MODELISATION DES REFLECTANCES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	91
III-2.1. Sensibilité des réflectances à la distribution angulaire des feuilles	91
III-2.2. Profils temporels de réflectances	94
III-3. VARIATIONS INTER-ANNUELLES DE REFLECTANCES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	96
III-3.1. Sensibilité du LAI aux pratiques culturales et aux conditions d'environnement	97
III-3.2. Variabilité inter-annuelle des réflectances/NDVI	98
III-3.3. Variation inter-annuelle d'un seul paramètre	101
III-3.4. Sensibilité des réflectances/NDVI aux paramètres de SAIL	105
III-4. CONCLUSION	106
CHAPITRE IV - ASSIMILATION D'OBSERVATIONS RADIOMETRIQUES - HAUTE RESOLUTION SPATIALE	109
IV-1. INTRODUCTION	111
IV-2. ASSIMILATION D'OBSERVATIONS SPOT HRV	112
IV-2.1. Résultats pour 8 configurations	112
IV-2.2. Cas détaillé d'une parcelle	113

IV-3. ASPECT METHODOLOGIQUE	116
IV-3.1. Sensibilité des modèles couplés et de l'algorithme de minimisation à une variation de date de semis	116
IV-3.2. Erreur engendrée par une méconnaissance de la variété sur l'ajustement de la date de semis	119
IV-3.3. Echantillonnage temporel	120
IV-3.4. Nombre d'acquisitions	122
IV-3.5. Dates d'acquisition	125
IV-3.6. Précision sur les observations	131
IV-4. CONCLUSION	135
CHAPITRE V - VERS L'ECHELLE REGIONALE - HAUTE ET BASSE RESOLUTIONS SPATIALES	139
V-1. INTRODUCTION	141
V-2. VARIATIONS INTER-ANNUELLES DU SIGNAL RADIOMETRIQUE DES PARCELLES DE BLE (SPOT HRV)	141
V-3. CONFRONTATION DES DONNEES SATELLITAIRES SPOT ET NOAA	144
V-4. COMPARAISON ENTRE LES REFLECTANCES AVHRR SIMULEES ET OBSERVEES	146
V-4.1. Recomposition du signal régional-Comparaison avec les données basse résolution	146
V-4.2. Impact du taux de couvert sur les réflectances simulées	150
V-5. CONCLUSION	153
CHAPITRE VI - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES	157
VI-1. SYNTHESE DES RESULTATS - DISCUSSION	159
VI-1.1. Sensibilité des données et modèles utilisés	159
VI-1.2. Simulation en mode direct - Haute résolution spatiale	161
VI-1.3. Assimilation d'observations satellitaires - Haute résolution spatiale	162
VI-1.4. Vers l'échelle régionale: le compromis résolution spatiale/résolution temporelle	163
VI-1.5. Conclusions - Améliorations nécessaires	165
VI-2. PERSPECTIVES	165
VI-2.1. Objectif: assimilation d'observations "régionales"	165
VI-2.2. L'alternative	166
VI-2.3. Utilisation conjointe des haute et basse résolutions spatiales	167
SYNTHESE DES RECHERCHES	169
Références bibliographiques	191
Liste des symboles	209
Liste des abréviations	211
Liste des figures	213
Liste des tableaux	217
ANNEXE I - DESCRIPTION DES MODELES	219
A. Le modèle AFRCWHEAT2	221
B. Modèles de transfert radiatif dans un couvert végétal	233
ANNEXE II - PUBLICATIONS ET ACTES DE COLLOQUE	263

INTRODUCTION

1. Contexte scientifique

Les travaux réalisés ces dernières années dans le cadre de l'étude du changement global du climat montrent que dans les modèles globaux, il est nécessaire de mieux prendre en compte d'une part l'influence d'une modification de la végétation sur le climat et d'autre part les conséquences d'un éventuel changement climatique sur les écosystèmes végétaux. En effet, l'état de la couverture végétale conditionne fortement les conditions aux limites des modèles de circulation générale, et par son contrôle sur les échanges d'énergie, de masse, et de quantité de mouvement, ainsi que par sa réaction aux modifications, la biosphère est une composante essentielle de la dynamique du climat (Garratt, 1993). S'il est intéressant de comprendre le fonctionnement des couverts végétaux et des sols pour évaluer l'influence du comportement de la végétation sur l'atmosphère, il est aussi fondamental d'améliorer la connaissance des mécanismes mis en jeu pour la compréhension de l'état et de l'évolution de la biosphère elle-même. D'importantes questions concernent le devenir de la couverture végétale à l'heure où l'action de l'homme modifie directement celle-ci ou intervient sur les paramètres qui la conditionnent. En conséquence, avoir les moyens de comprendre les différents échanges qui régissent la croissance et le développement des espèces en fonction de tous les paramètres impliqués, et particulièrement les paramètres météorologiques, peut aider, par exemple, à déterminer une éventuelle modification des espèces et de leurs répartitions géographiques dans un contexte de changement climatique.

Afin d'appréhender les mécanismes régissant la phénologie, un suivi temporel est nécessaire, en revanche, seules des études locales conduiront à une compréhension des différents processus biophysiques propres aux couverts végétaux comme la photosynthèse ou la transpiration. Si les échanges interviennent au niveau de la feuille et peuvent être considérés comme homogènes pour un couvert végétal donné, les échelles d'espace concernées par la modification des différents flux s'étendent à l'ensemble du globe du fait des circulations atmosphérique et océanique. De même, alors que les mécanismes d'échange sont quasi-instantanés, l'évolution du comportement de la biosphère s'observe à

une échelle pluriannuelle. Il est donc nécessaire de disposer d'une part, de données globales et fréquentes, et d'autre part, de modèles de fonctionnement décrivant le développement et la croissance du couvert végétal. La télédétection satellitaire constitue un outil essentiel pour l'observation de la biosphère terrestre et de son évolution, elle permet l'acquisition de données fréquentes à l'échelle globale. Les modèles doivent fournir une description des variations spatio-temporelles des observables afin d'interpoler les données, ils doivent également permettre de relier l'évolution des paramètres radiatifs observés aux processus biophysiques gouvernant le comportement du couvert. Différents mécanismes qu'il est impossible d'obtenir directement par simple mesure radiative seront alors accessibles, c'est en particulier le cas des flux de CO₂ ou du développement phénologique du couvert.

2. Atouts de la télédétection

Les données satellitaires fournissent une information régulière et sur de vastes étendues, aussi la télédétection est devenue un outil très intéressant, qui présente divers avantages :

- la donnée satellitaire est issue d'une mesure physique, ceci évite la notion de subjectivité lors de son interprétation,
- les observations satellitaires permettent de spatialiser les données dans l'espace et dans le temps,
- des observations satellitaires sont disponibles quasiment en tout point du globe, bien que l'on soit limité par les conditions météorologiques notamment dans le domaine des courtes longueurs d'onde.
- l'enregistrement numérique des mesures acquises permet un traitement et une analyse rapide de l'information.

Les observations satellitaires peuvent contribuer à l'étude de la végétation à la surface de la Terre. Dans le domaine du spectre solaire, les capteurs conçus pour l'observation de la Terre ont été embarqués à bord de satellites héliosynchrones depuis le milieu des années 1970. Les capteurs AVHRR embarqués sur les satellites

météorologiques de la NOAA fournissent des images quotidiennes dans le domaine du visible et du proche infrarouge (PIR) depuis 1979, avec une résolution maximale de 1.1 km. Les satellites d'observation de la Terre ont une fréquence temporelle plus basse, mais une meilleure résolution spatiale. Ainsi, avec les capteurs TM et MSS embarqués sur les satellites Landsat depuis 1972, et les capteurs de type HRV embarqués sur SPOT depuis 1986, on peut suivre l'évolution radiométrique d'une parcelle cultivée. Grâce à des données radiométriques terrain sur un couvert de blé, Tucker *et al.* (1981) ont montré qu'une relation existait entre la production et un cumul d'indice de végétation (combinaison de mesures dans le visible et le PIR) pendant la saison de croissance. Cette relation a ensuite été établie avec des observations satellitaires (Tucker *et al.*, 1985), et fut à l'origine d'un modèle empirique exprimant la production de biomasse en fonction d'indices de végétation cumulés d'une prairie au Sahel. De telles relations sont obtenues car les évolutions temporelles des mesures radiométriques dans le visible et le PIR sont un reflet du développement du couvert et de sa capacité à absorber le rayonnement photosynthétiquement actif qui conditionnent la production de matière sèche. Les relations entre les indices de végétation et le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé peuvent être établies de façon théorique (Sellers, 1985) et expérimentale (Asrar, 1984). Par contre les relations entre les cumuls d'indice de végétation et la biomasse sèche ou la productivité sont empiriques. Ainsi pour estimer la biomasse, il faut décrire la conversion de l'énergie photosynthétiquement active en biomasse sèche. Une revue bibliographique décrit les diverses techniques utilisées pour dériver la biomasse ou la productivité des observations satellitaires (Fischer *et al.*, 1995).

L'information satellitaire est d'ores et déjà utilisée pour la mise en place de la politique agricole aussi bien à l'échelle régionale, nationale qu'au sein de l'Union Européenne. Cependant, les applications opérationnelles actuelles n'utilisent qu'une faible partie des potentialités de la télédétection. Le plus souvent, seule une analyse descriptive des données est effectuée. Une approche quantitative demande une démarche plus avancée et des méthodologies plus complexes. L'une de ces approches est l'utilisation combinée de modèles de fonctionnement et d'observations satellitaires dans le double objectif de mettre

au point de nouvelles méthodologies de couplage, et d'estimer la production d'une culture à l'échelle régionale.

3. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte général, cette étude concerne le couplage entre un modèle de fonctionnement et des observations satellitaires et plus précisément l'intégration d'observations satellitaires dans les modèles de fonctionnement de la végétation, l'objectif principal étant de mieux décrire le fonctionnement de la végétation et ses échanges avec l'atmosphère et le sol à l'échelle globale. Compte tenu de la complexité du problème, nous nous intéressons essentiellement aux zones de grandes cultures tempérées, milieu pour lequel des connaissances précises ont été acquises depuis longtemps. On peut ainsi contrôler au mieux les paramètres influant sur la végétation. Le thème de cette Thèse se situe donc :

- (i) d'une part dans le contexte scientifique de l'étude des interactions entre la végétation et le climat,
- (ii) d'autre part dans le cadre plus appliqué, de l'estimation des productions sur de grandes zones agricoles.

Deux objectifs se dégagent de cette problématique :

On utilise de façon couplée les observations satellitaires, avec des capteurs haute et/ou basse résolution permettant d'aborder l'échelle de la parcelle et l'échelle régionale, et les modèles de fonctionnement, dans le but de :

- (i) développer des méthodologies, en matière d'intégration d'observations satellitaires ("assimilation"), en milieu "contrôlé". Il s'agit d'une étape préliminaire avant l'extension à des milieux naturels plus complexes (mélange de divers types de végétation),
- (ii) estimer des rendements ou des variations de rendements. Il s'agit d'évaluer la capacité des observations satellitaires -couplées à des modèles de fonctionnement- à améliorer l'estimation du rendement des cultures sur plusieurs années, sans avoir besoin d'enquêtes terrain onéreuses (Maas, 1988).

4. Démarche

La télédétection permet d'obtenir des informations concernant le cycle saisonnier de la végétation et sa structure [voir une revue des méthodes par Andrieu and Baret, 1993]. Sur les grandes régions agricoles, la donnée satellitaire est d'ores et déjà utilisée pour l'estimation du rendement des cultures, lorsqu'elle est combinée à des modèles de simulation du fonctionnement de culture [voir revue des méthodes par Delécolle *et al.*, 1992; Fischer *et al.*, 1995]. Une des techniques consiste à simuler le signal radiométrique observé en couplant un modèle de fonctionnement à un modèle de réflectance (par l'intermédiaire d'un indice foliaire), puis à ajuster certains paramètres du modèle de fonctionnement grâce aux observations (Bouman, 1991a). Sauf dans le cas d'expérimentation locale, les paramètres d'entrée des modèles de fonctionnement relatifs aux pratiques culturales (date de semis, variété, etc.) sont inconnus à l'échelle de la région agricole. Dans la perspective de prévision d'une production à la fois sur une quelconque parcelle, et surtout à l'échelle régionale, il semble pertinent de tenter d'ajuster les paramètres inconnus à l'aide d'observations satellitaires. Ceci suppose :

- (i) que le modèle de fonctionnement décrive les processus biophysiques nécessaires au calcul du rendement et de la productivité primaire,
- (ii) que le modèle de transfert radiatif soit très sensible aux variations de l'indice foliaire (qui permettront d'ajuster le modèle de fonctionnement), ainsi qu'aux variations de paramètres perturbateurs (tels que les propriétés optiques des feuilles et du sol sous-jacent ou la distribution angulaire des feuilles, qu'il est difficile de connaître à cette échelle),
- (iii) que les observations satellitaires soit étalonnées et corrigées des effets atmosphériques et qu'une estimation de la précision sur les mesures soit donnée.

5. Compromis résolution spatiale et résolution temporelle

L'agriculture mixte est présente dans la plupart des régions agricoles tempérées, où la taille des parcelles est généralement plus petite que la résolution spatiale des capteurs fournissant des acquisitions quotidiennes (exemple : NOAA AVHRR). En utilisant des données haute résolution spatiale (exemple : SPOT HRV ou Landsat TM), la limite est le faible nombre d'observations disponibles durant la saison de croissance dû à la faible fréquence temporelle (champ de vue étroit et cycle orbital), à la couverture spatiale et au coût de l'acquisition. La couverture nuageuse diminue encore l'échantillonnage temporel. L'évolution de la croissance et du développement du couvert est très rapide à des stades phénologiques spécifiques (Bouman, 1991a), et des événements climatiques, comme les gelées, peuvent conduire à une réponse rapide du comportement du couvert qu'il est économiquement important de détecter. Ainsi, au cours de cette étude, nous avons jugé pertinent d'utiliser en plus des observations haute résolution spatiale SPOT HRV, des observations quotidiennes acquises par le capteur à faible résolution spatiale NOAA AVHRR. Il faut bien entendu s'assurer que le signal radiométrique soit interprétable à cette échelle. En effet, les signaux NOAA AVHRR sont constitués des contributions radiométriques de la végétation naturelle et des cultures qui sont différentes au niveau de leurs croissances et de leurs calendriers phénologiques.

6. Mise en oeuvre de l'étude

Cette étude, effectuée au LERTS/CESBIO (CNES/CNRS/UPS), s'insère dans divers projets : "Synergie entre modèles de fonctionnement de la végétation et observations satellitaires", financé par le CNES, le CNRS, et la Région Midi-Pyrénées, le "Programme National de Télédétection Spatiale" et le projet "Agriculture" (MARS) de la CEE mis en oeuvre par le Centre Commun de Recherches d'Ispra.

Ces travaux ont été réalisés en étroite collaboration avec l'INRA (bioclimatologie, Avignon, et agronomie, Laon). Le CCR Ispra nous a fourni les scènes SPOT, SCOT

conseil et la SOTEMA nous ont fourni les résultats des enquêtes terrain et ont effectué les traitements des données SPOT.

7. Plan du mémoire

Afin d'atteindre nos objectifs, nous soulevons un certain nombre de questions auxquelles nous nous efforcerons de répondre aux travers des divers chapitres.

- Chapitre I : Une revue bibliographique est effectuée concernant les divers domaines abordés : l'estimation de la productivité à partir d'observations satellitaires, la stratégie de l'inversion d'observations satellitaires et l'interprétation du signal basse résolution spatiale. Nous décrivons ensuite la démarche utilisée dans le cadre de cette étude, pour le couplage modèle de fonctionnement/observations satellitaires.

- Chapitre II : Il s'agit d'une description des données utilisées (satellitaires et de terrain) ainsi que des modèles de fonctionnement et de réflectance employés pour la simulation du signal radiométrique. La sensibilité de chacun des outils utilisés à divers paramètres est évaluée. On cherche en particulier à répondre à la question suivante : Peut-on estimer l'erreur due à la méconnaissance de certains paramètres sur la simulation, et l'erreur sur les observations liée aux conditions de mesure?

- Chapitre III : Dans le cadre de la simulation en mode direct du signal haute résolution spatiale, on tente de répondre aux questions suivantes :

Peut-on prévoir des réflectances satellitaires par le couplage d'un modèle de fonctionnement et d'un modèle de transfert radiatif dans le couvert, à haute résolution spatiale ?

Peut-on prédire et observer des variations inter-annuelles de profil temporel de réflectances (ou combinaison de réflectances)?

Peut-on attribuer ces variations de réflectances à des différences objectives de paramètres/variables liés à la culture (date de semis, variété) ou au forçage (météorologie)?

Ces variations de paramètres ont-elles un impact sur la productivité?

- Chapitre IV : La stratégie d'assimilation d'observations radiométriques haute résolution spatiale dans un modèle de fonctionnement soulève les questions suivantes :

Peut-on retrouver les variations des paramètres liés à la culture ou au forçage climatique, par couplage modèles/observations. Dans l'affirmative, quel type d'observations est-il judicieux d'utiliser en terme d'échantillonnage temporel, de nombre d'observations, de dates d'acquisition et de précision de la mesure?

- Chapitre V : Nos perspectives d'extension des techniques d'assimilation à l'échelle régionale soulèvent la question suivante :

Peut-on prévoir des réflectances satellitaires basse résolution spatiale par le couplage d'un modèle de fonctionnement et d'un modèle de transfert radiatif dans le couvert?

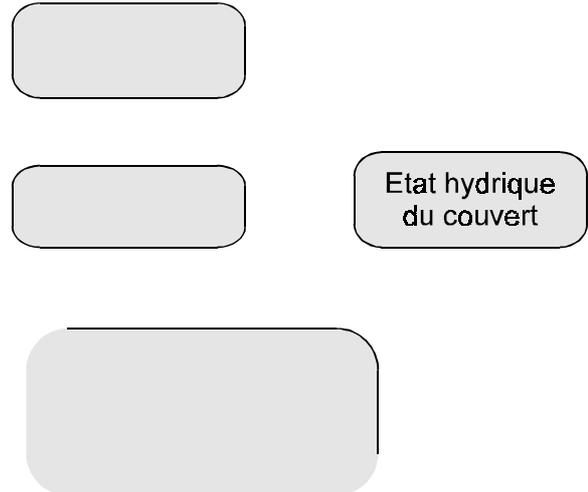
- Chapitre VI : Une synthèse des résultats présentés dans ce manuscrit est effectuée, et des perspectives sont proposées.

CHAPITRE I

SYNERGIE MESURES SATELLITAIRES - MODELES DE FONCTIONNEMENT : PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

I-1. TELEDETECTION DE LA VEGETATION

Les mesures obtenues par télédétection dans les divers domaines de longueur d'onde peuvent fournir des informations relatives à l'estimation de la production (fig. I-1).



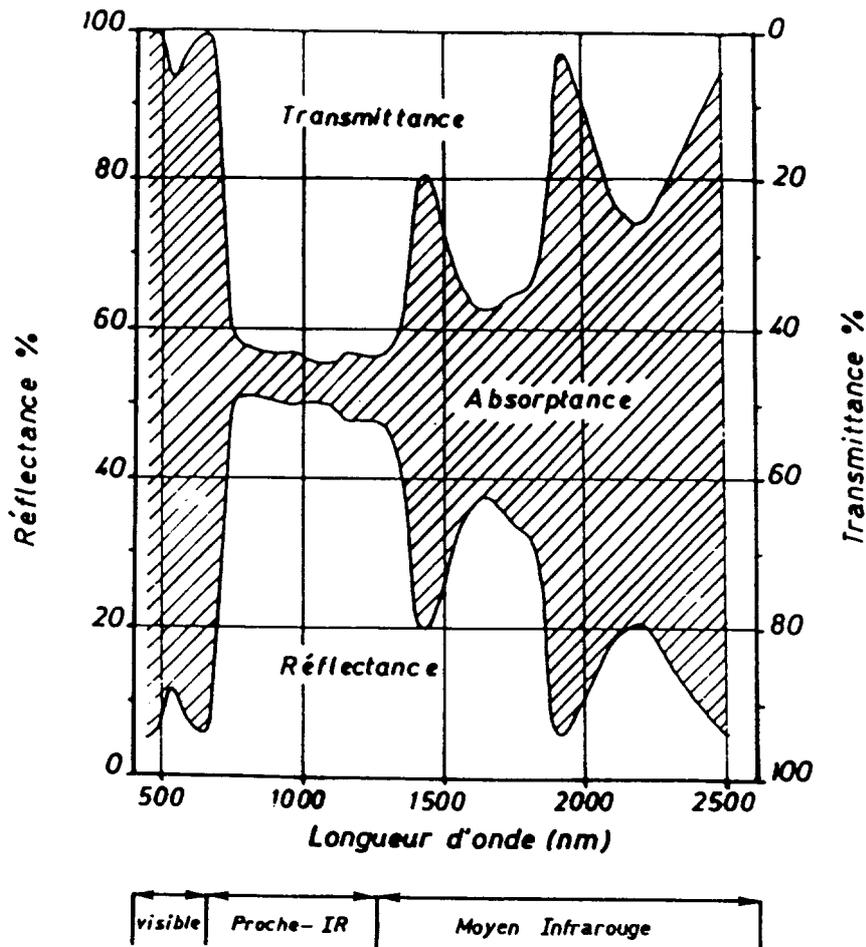


Figure I-2 : Réflectance et transmittance d'une feuille en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident, d'après Guyot (1984).

La réflectance d'un couvert est généralement inférieure à celle d'une feuille (sauf dans le PIR, pour un couvert pleinement développé), du fait de l'atténuation induite par les angles d'illumination, les ombres et l'influence du sol.

La différence de réflectance observée dans le visible et dans le proche infrarouge est largement exploitée. Elle a notamment conduit à l'élaboration de divers indices de végétation combinant les réflectances acquises dans ces deux gammes de longueur d'onde. Cette rupture au niveau du profil spectral des réflectances entre visible et PIR caractérise d'autant plus la végétation, qu'elle n'existe pas pour le profil spectral du sol (fig. I-3).

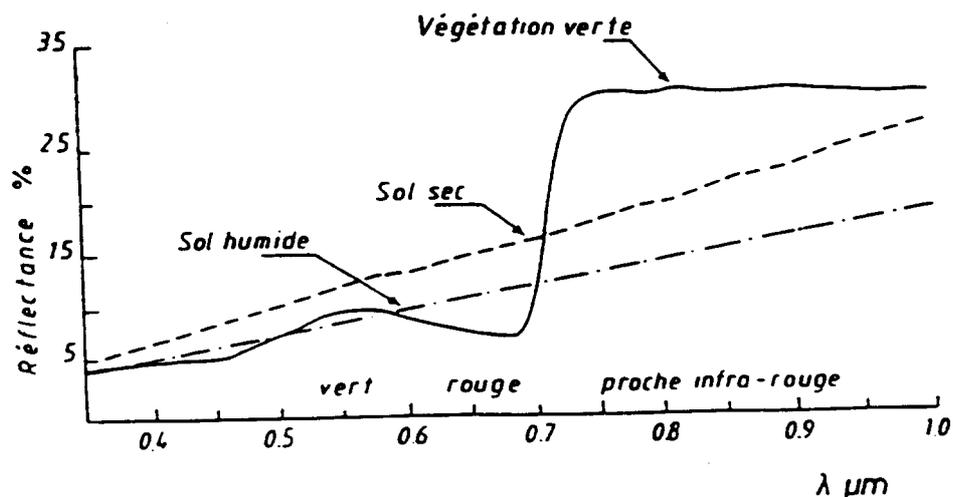


Figure I-3 : Comparaison schématique des réflectances d'un couvert herbacé et d'un sol nu (Tucker and Miller, 1977).

La différence des réflectances dans le visible et dans le PIR permet donc également d'atténuer la contribution du sol sous-jacent au niveau du signal mesuré.

I-2. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

I-2.1. Productivité et observations satellitaires

Différents types de modèle de végétation ont été utilisés en complémentarité avec la télédétection spatiale. Les modèles empiriques, reliant par exemple la production de biomasse et un indice de végétation (Tucker *et al.*, 1986) sont difficiles à utiliser en dehors de leur domaine d'application (site et type de végétation donnés). Les modèles semi-empiriques, comme les fonctions double-logistiques qui décrivent le profil radiatif temporel de différentes cultures à basse résolution spatiale (Fischer, 1994), peuvent simuler le profil saisonnier de la végétation (sous forme d'indice de végétation). D'autres modèles consistent en une simple description du couvert. Par exemple, un indice de végétation télédétekté est utilisé pour dériver l'efficacité d'absorption du rayonnement solaire (Kumar and Monteith, 1981). Mais, de façon générale, les relations empiriques et les paramétrisations ne sont pas suffisantes pour décrire les mécanismes biophysiques.

En revanche, dans les modèles plus mécanistes (par exemple, Porter, 1993), des entrées météorologiques quotidiennes, des caractéristiques du sol et les pratiques culturales pilotent la simulation de la croissance de la culture et le développement du couvert à un

pas de temps journalier. Les processus impliqués sont simulés par des relations soit biophysiques, soit empiriques et prennent en compte les différents niveaux d'interaction entre les mécanismes. La modélisation des échanges biochimiques (flux de carbone, évapotranspiration) et de la phénologie de la culture, résulte dans la modélisation du développement de la culture (indice foliaire ou LAI). Le principal objectif de tels modèles est l'estimation du rendement à la fin de la saison de croissance. Ces modèles mécanistes fonctionnent sans observations satellitaires en entrée. Cependant, des variables radiatives (par exemple, les réflectances) peuvent être dérivées de certaines variables d'état du modèle (par exemple, le LAI), au moyen d'un modèle de transfert radiatif.

a) Modèle simple de Monteith

Le modèle d'efficience de Monteith (1977) a été adapté à l'utilisation de données radiométriques (Kumar and Monteith, 1981). Ce modèle considère que les données télédéteectées donnent une information qualitative sur l'activité de la végétation. Une relation semi-empirique permet de calculer la production quotidienne de matière sèche en fonction du rayonnement solaire incident total (parts directe et diffuse) par l'intermédiaire de 3 efficacités. La première est l'efficience climatique c'est à dire la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif dans le rayonnement global. La seconde est l'efficience d'interception du rayonnement c'est à dire la capacité du couvert à intercepter le rayonnement photosynthétiquement actif (de 0 pour un sol nu à 0.95 pour un couvert vert dense). La troisième est l'efficience de conversion biologique du rayonnement photosynthétiquement actif en matière sèche. L'efficience climatique peut être considérée constante (Varlet-Grancher *et al.*, 1982). L'efficience d'interception du rayonnement dépend des propriétés optiques du couvert et peut ainsi être dérivée des mesures de réflectances ou de combinaisons de réflectances (Baret and Olioso, 1989). L'efficience de conversion biologique est 0 quand des conditions environnementales (externes) ne permettent pas d'obtenir une production primaire nette positive, et peut atteindre environ 3.5gDM.MJ-1 dans des conditions optimales. C'est une caractéristique biologique qui résulte de l'ensemble des mécanismes affectant l'assimilation du CO₂ : les métabolismes en

C3 ou C4, la température ambiante, la disponibilité en eau et en nutriments, le développement phénologique (Garcia *et al.*, 1988). Les valeurs empiriques proviennent généralement de la littérature (Gosse *et al.*, 1986), elles correspondent à la pente de l'ajustement matière sèche/rayonnement absorbé ou intercepté.

Les données satellitaires ont été employées pour déterminer l'évolution de l'efficacité d'interception pendant la saison de croissance, ce modèle simple de Monteith a alors permis l'estimation de la production de différentes cultures. Par exemple, des mesures dans le visible et le PIR (SPOT) ont été utilisées par Leblon *et al.* (1991) pour des parcelles de riz.

Sur des couverts semi-arides, où les conditions hydriques peuvent fortement affecter l'efficacité de conversion (Steinmetz *et al.*, 1990), les mesures dans l'infrarouge thermique permettent le calcul d'un indice de stress hydrique. La différence entre la température de surface et la température de l'air est un indicateur du stress hydrique (Seguin *et al.*, 1991; Seguin *et al.*, 1992). La température de l'air est une information météorologique, et la température de surface est dérivée de mesures effectuées dans l'infrarouge thermique (Lagouarde *et al.*, 1991). Grâce à l'utilisation combinée de données satellitaires dans les courtes longueurs d'onde et dans l'infrarouge thermique (acquises par NOAA AVHRR), la production céréalière a été estimée en zone semi-aride sur 2 ans dans des configurations hydriques variées (Guérif *et al.*, 1993).

Le modèle diagnostic de Monteith, qui utilise les observations satellitaires en entrée, a pour avantage d'être simple à utiliser, à condition qu'une bonne estimation de l'efficacité biologique soit disponible. Cependant les mécanismes physiologiques et biologiques qui conditionnent la croissance et le développement, et ainsi l'évolution de l'efficacité biologique, ne sont pas décrits. Les modèles agrométéorologiques décrivent avec plus ou moins de précision ces processus.

b) Les modèles agrométéorologiques

Ces modèles simulent l'évolution temporelle des diverses variables d'état de la plante : l'indice foliaire (LAI), la biomasse des différents organes (feuilles, tiges, racines, grains), ainsi que les flux d'énergie, de carbone, d'eau et de nutriments entre la plante, le sol et l'atmosphère. L'évolution de ces variables au cours de la saison de croissance dépend des conditions météorologiques et pédologiques ainsi que des pratiques culturales. De tels modèles de production sont maintenant disponibles pour la plupart des cultures (IBSNAT, 1993). Certains modèles sont complexes lorsque des relations mécanistes décrivent les processus et leurs interactions conduisant à l'estimation de la production (par exemple, AFRCWHEAT (Weir *et al.*, 1984) ou SUCROS (Spitters *et al.*, 1989)). Ils fonctionnent généralement au pas de temps journalier même si certains processus comme la photosynthèse sont décrits avec un pas de temps plus fin. Il est important de décrire correctement l'évolution saisonnière du LAI, en effet cette variable conditionne l'absorption du rayonnement solaire et l'évapotranspiration, et ainsi l'assimilation du CO₂. Mais le développement du couvert ainsi que l'allocation des assimilats vers les feuilles (permettant l'incrément de la surface foliaire) sont décrits par des relations empiriques. Ainsi, une incertitude sur les coefficients régissant ces relations induit des erreurs significatives sur l'estimation de la production de biomasse (Porter, 1984).

C'est alors que l'information radiométrique acquise dans diverses bandes de longueur d'onde a été utilisée pour contraindre la modélisation (Wiegand *et al.*, 1986). Le visible et le PIR sont utilisés pour la structure du couvert et l'activité photosynthétique, l'infrarouge thermique pour le bilan hydrique, les micro-ondes actives ou passives pour le contenu en eau, l'humidité du sol et la structure du couvert (fig. I-1). Au cours de la dernière décennie, de nombreuses améliorations relatives au traitement et à l'interprétation des observations satellitaires ont été obtenues. De nouvelles et diverses stratégies concernant l'utilisation conjointe de modèles de fonctionnement et d'observations satellitaires sont apparues. Les observations permettent de contraindre le modèle dans le but d'estimer des conditions initiales ou des paramètres du modèle. Les diverses stratégies

utilisées pour coupler les modèles de fonctionnement et les observations satellitaires sont décrites ci-dessous.

I-2.2. La stratégie de l'inversion

Divers auteurs ont utilisé la télédétection en complémentarité avec des modèles de végétation [voir les synthèses effectuées par Seguin *et al.* (1992), Delécolle *et al.* (1992), et Fischer *et al.*, 1995]. L'utilisation conjointe des modèles déterministes et des observations radiométriques a été abordée sous différentes formes par Maas (1988a). Dans le modèle utilisé (GRAMI), la description des mécanismes qui pilotent le développement est remplacée par une paramétrisation de l'évolution temporelle du LAI. La qualité de l'estimation de ces coefficients de paramétrisation conditionne la qualité de l'estimation de la production. Il faut généralement effectuer un étalonnage pour un site donné, une culture donnée et une année donnée. Dans la perspective d'une étude à l'échelle régionale, où l'on ne dispose pas de surveillance terrain, les variations spatiales des conditions d'environnement ne pourront être prises en compte que si le signal radiométrique donne une information sur l'indice foliaire. La stratégie générale est la suivante : des variables qui apparaissent directement dans les processus modélisés sont dérivées d'observations satellitaires. Par exemple, le LAI est dérivé d'indices de végétation (combinaison de réflectances visible et PIR) et un indice de stress réducteur de l'assimilation quotidienne de CO₂, est dérivé des canaux thermiques. Les différentes techniques d'inversion permettant d'utiliser ces variables au sein du modèle vont maintenant être décrites (Fischer *et al.*, 1995).

La plupart des auteurs ont dérivé des variables biophysiques à partir de données satellitaires et ensuite introduit ces variables dans des modèles de végétation par une méthode de forçage. Cette approche a été utilisée à la fois sur des couverts naturels (Running *et al.*, 1989; Lüdecke *et al.*, 1991) et des couverts de culture (Leblon et Guérif, 1991; Maas *et al.*, 1985) et montre l'intérêt des mesures télédéteectées pour obtenir une spatialisation des variables comme les flux de carbone ou la production d'une culture. Une

approche alternative aux techniques de forçage est basée sur le "contrôle" ou l'"assimilation", c'est à dire, l'utilisation directe de séries temporelles d'observations dans le modèle. Dans cette approche, quelques paramètres du modèle de végétation sont optimisés au moyen d'une minimisation entre des variables prédites et observées comme les réflectances. A l'échelle de la parcelle, l'assimilation des mesures radiatives a été effectuée en utilisant des données terrain (par exemple Bouman, 1991b). Nous distinguons ici 3 approches de l'inversion (forçage, ré-étalonnage et assimilation).

a) La stratégie de forçage

Il s'agit de restituer des variables biophysiques qui sont utilisées en données d'entrée du modèle (fig. I-4).

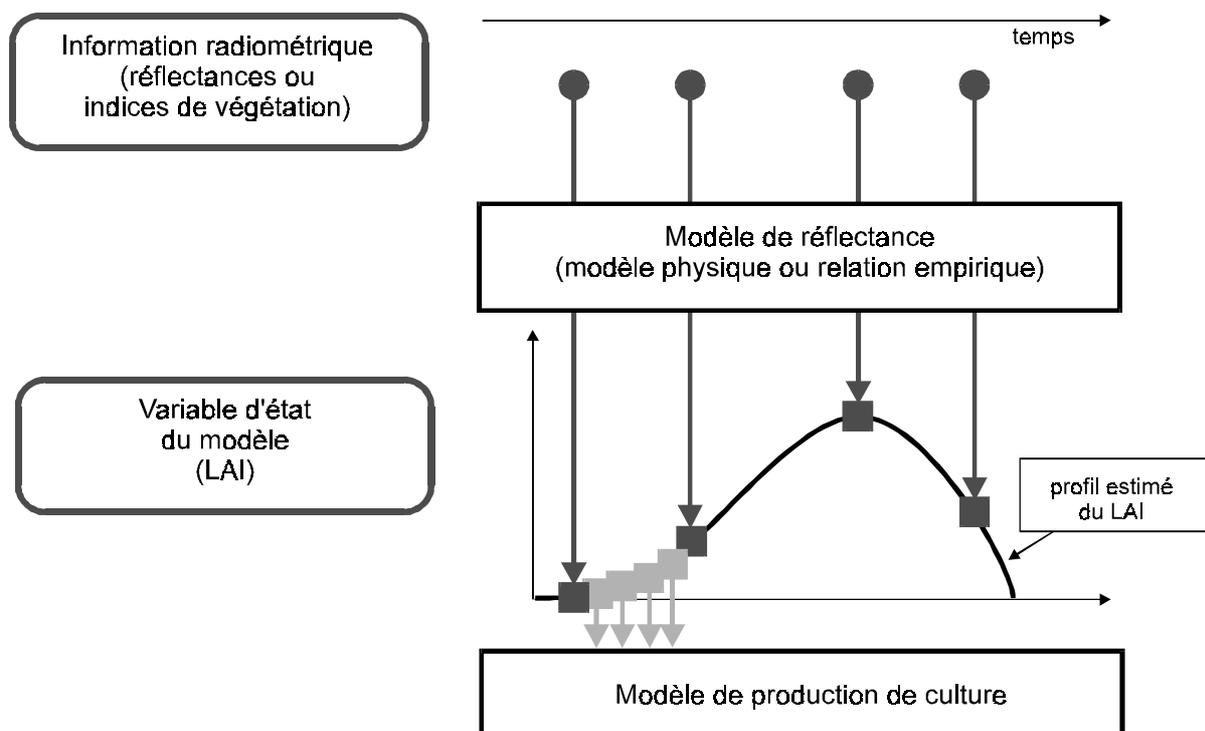


Figure I-4 : Représentation de la méthode de forçage : le comportement temporel d'une variable d'état du modèle est dérivé des observations satellitaires et est utilisé comme donnée d'entrée (d'après Delécolle et al., 1992).

Mass et al. (1985) ont testé cette approche en utilisant des mesures radiométriques (longueurs d'onde optique et thermique) terrain effectuées au dessus d'un couvert de maïs. Les valeurs de LAI sont dérivées à partir des indices de végétation (issus des mesures), de même, le calcul de la température de surface permet de déduire l'indice de stress hydrique.

On substitue alors ces variables à celles simulées par le modèle à chaque fois qu'une observation est disponible. La simulation de l'évolution de la biomasse s'en trouve améliorée. Cette stratégie a ensuite été employée (Delécolle et Guérif, 1988) en utilisant un modèle déterministe (AFRCWHEAT) et des observations satellitaires SPOT HRV sur un couvert de blé d'hiver. Comme la fréquence temporelle de ces données est faible, le LAI dérivé des données est interpolé à un pas de temps journalier avant d'être utilisé en entrée du modèle de culture. L'erreur moyenne sur l'estimation du rendement a été diminuée.

Donc, les valeurs de LAI sont ici dérivées d'un indice de végétation dans le but d'avoir des variables de contrôle externes permettant de corriger une modélisation incertaine. Cette approche a certaines limites. On substitue à un LAI modélisé un LAI "observé" (c'est à dire dérivé de l'observation), on suppose donc implicitement que la simulation du LAI n'est pas correcte et par là même que les autres processus décrits par le modèle sont également incorrects. Or si l'on veut pouvoir estimer des paramètres qu'il est impossible d'obtenir directement par télédétection, tels que la biomasse, il est nécessaire que les processus soient décrits correctement par le modèle. Le LAI "observé" peut être utilisé de façon différente, en particulier pour ajuster des paramètres pertinents du modèle ou encore des conditions initiales, dans le but d'obtenir une cohérence entre l'évolution temporelle des LAI modélisés et "observés". Cette stratégie, détaillée ci-dessous, permet en outre de conserver une certaine cohérence au niveau de l'ensemble des processus décrits par le modèle.

b) La stratégie de ré-étalonnage

Il s'agit d'inverser des variables biophysiques qui sont ensuite utilisées pour réajuster ou ré-initialiser le modèle de fonctionnement (I-5).

Cette approche a été utilisée par Maas *et al.* (1989) qui ont utilisé des mesures radiométriques terrain sur un couvert de maïs pour contraindre la simulation d'un modèle de culture (GRAMI). Les valeurs de LAI sont dérivées des mesures optiques (canaux visible et PIR de Landsat/TM) et celles d'un indice de stress sont dérivées de mesures thermiques. Le LAI "observé" permet un ajustement des paramètres de forme décrivant

l'évolution temporelle du LAI simulé : la paramétrisation est obtenue avec une valeur initiale pour le LAI le jour de l'émergence, et un jeu de paramètres pour la forme de l'évolution saisonnière du LAI. L'indice de stress "observé" permet de ré-initialiser le module de bilan hydrique du sol. On obtient une amélioration de l'estimation du profil temporel de biomasse et du rendement. L'évolution temporelle du LAI "observé" a permis l'initialisation d'un modèle de sorgho (Maas, 1988b) et le réajustement complet du même modèle sur une culture de blé d'hiver (Maas, 1991).

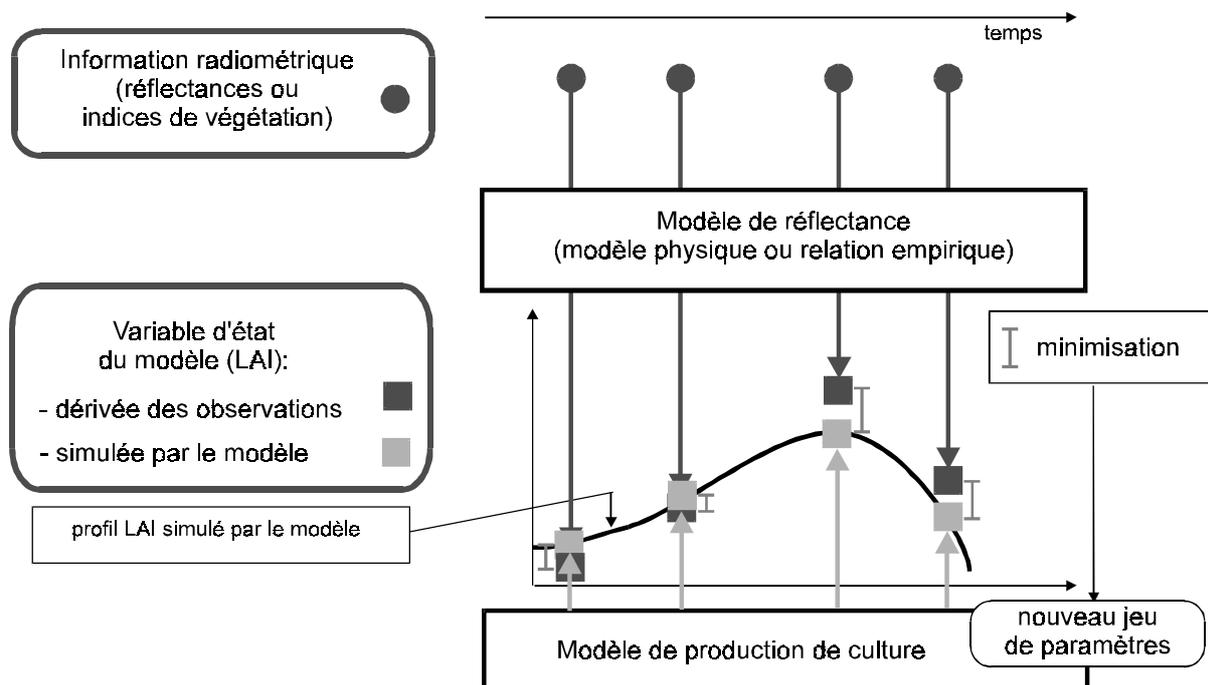


Figure I-5 : Représentation de la méthode de re-paramétrisation ou ré-étalonnage : la comparaison entre le profil LAI simulé par le modèle et les "observations LAI" dérivées des données satellitaires permet l'ajustement de certains paramètres ou conditions initiales (d'après Delécolle et al., 1992).

Due à l'utilisation de procédures de minimisation pour réduire la différence entre la simulation et l'observation, cette stratégie nécessite un temps de calcul plus important que la stratégie de forçage. Mais cette approche est plus satisfaisante car elle améliore l'ensemble des processus modélisés et pas seulement la description de certaines variables. Toutefois, la relation permettant l'inversion des données satellitaires en LAI est empirique. Cette relation doit donc être calibrée en fonction du site. De plus, l'incertitude est grande lorsque les LAI sont supérieurs à 3 à cause du phénomène de saturation des réflectances, ainsi qu'aux faibles valeurs de LAI car l'influence du sol est alors importante.

Pour pallier le problème d'inversion du LAI à partir des réflectances, une alternative consiste à utiliser directement les observations radiométriques (réflectances) pour contraindre le modèle de fonctionnement. Des modèles de transfert radiatif permettent de reproduire des réflectances observées à partir de LAI modélisés. La tendance actuelle est ainsi d'utiliser directement les mesures radiométriques observées sans inversion d'une variable intermédiaire.

c) La stratégie d'assimilation

Il s'agit d'utiliser l'observation satellitaire sous forme de réflectances pour réajuster ou ré-initialiser un modèle de fonctionnement (fig. I-6).

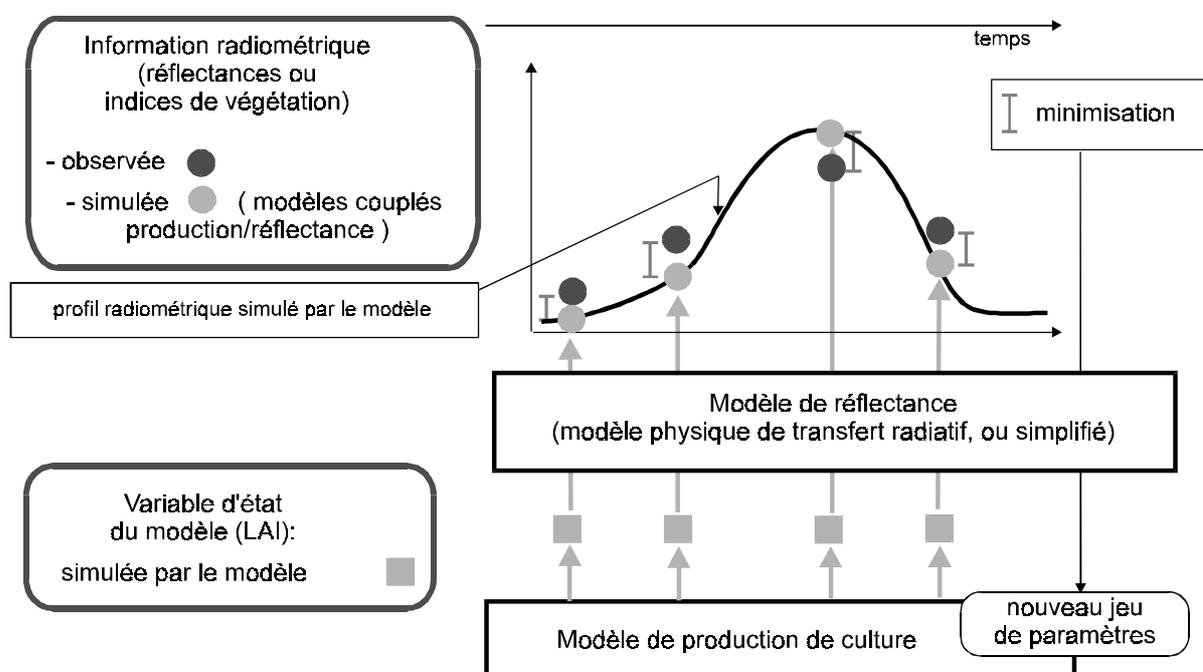


Figure I-6 : Représentation de la méthode d'assimilation : la comparaison entre le profil de réflectances simulées par les modèles couplés production et transfert radiatif avec les réflectances observées permet l'ajustement de certains paramètres ou conditions initiales du modèle (d'après Fischer et al., 1995).

On considère que le couplage d'un modèle de transfert radiatif et d'un modèle de fonctionnement permet de reproduire l'évolution temporelle des réflectances d'un couvert, telle qu'elle peut être obtenue par observations satellitaires. Ceci exige que les données aient été au préalable correctement étalonnées et corrigées des perturbations atmosphériques. Les réflectances simulées sont comparées aux réflectances observées, la différence entre les deux est minimisée par l'ajustement d'un ou plusieurs paramètres

pertinents du modèle de fonctionnement. Pour être ajustés, les paramètres pertinents doivent contraindre fortement aussi bien l'évolution du signal radiométrique (réflectances) que l'évolution des variables biologiques d'intérêt. C'est pourquoi, les principaux paramètres gouvernant le développement du couvert végétal sont intéressants.

Bouman (1991b) a utilisé des mesures radiométriques de terrain sur un couvert de betterave pour réajuster un modèle de fonctionnement (SUCROS). Un modèle de réflectance et un modèle de rétrodiffusion ont été couplés au modèle de fonctionnement pour simuler les mesures acquises respectivement dans le visible et le PIR, et dans les micro-ondes (actives). La minimisation de la différence entre les profils temporels simulés et observés a permis le réajustement de la date de semis -condition initiale importante pour le développement-, et de 3 paramètres contraignant l'efficacité de photosynthèse et le taux de croissance du couvert. Le réajustement a amélioré l'estimation de la production.

Cette approche a ensuite été testée, dans le cadre de ma Thèse, en utilisant des observations satellitaires à haute résolution spatiale sur un couvert de blé d'hiver. Quatre scènes SPOT HRV sont disponibles durant la saison de croissance, cependant 3 sont acquises dans un intervalle de 6 jours au moment du maximum d'activité de la plante (phase de maturité), l'autre acquisition correspond au début de la phase de croissance. Après étalonnage et corrections atmosphériques, les réflectances mesurées dans le visible et dans le PIR peuvent être comparées aux réflectances simulées par les modèles couplés fonctionnement/réflectance (AFRCWHEAT2/SAIL). Comme peu d'acquisitions sont disponibles, un seul paramètre -la date de semis- a été ajusté pour minimiser la différence entre simulation et observations. Ce paramètre influence la phénologie et le développement du couvert, c'est également une condition initiale difficilement maîtrisée à l'échelle régionale si l'on s'intéresse à toutes les parcelles et pas seulement aux parcelles expérimentales. Ces premiers résultats ont montré que la date de semis obtenue après réajustement est proche de la date de semis moyenne observée sur la région (enquête terrain). Si l'on utilise la date ajustée en entrée du modèle de fonctionnement, l'estimation du rendement obtenue est proche de l'estimation donnée par les agriculteurs.

Ces résultats sont des éléments encourageants concernant l'intérêt du couplage des modèles de fonctionnement et des observations satellitaires, dans le but d'estimer la production d'un couvert végétal. La stratégie d'assimilation de données satellitaires permet l'estimation de paramètres nécessaires à une bonne modélisation, tels que des conditions initiales ou des paramètres propres au modèle. Cette approche permet donc de considérer que la modélisation obtenue est fiable pour des zones où aucune information terrain n'est disponible. Pourtant, la faible fréquence temporelle des acquisitions haute résolution spatiale limite le nombre d'observations disponibles pendant la période de croissance de la culture. Ainsi, tous les paramètres ne peuvent être ajustés avec si peu d'observations, c'est en particulier le cas de paramètres variétaux, tels que les sensibilités à la photopériode et à la vernalisation, qui ont un impact important sur le développement phénologique et qui dépendent de la variété. Si l'on considère que tous ces paramètres influencent le développement du couvert et la production de biomasse, ils devraient tous être ajustés. On se heurte ici au problème du compromis entre les capteurs à haute résolution spatiale mais faible fréquence temporelle et des capteurs à haute répétitivité mais faible résolution spatiale. On a besoin de davantage d'observations, donc d'une fréquence temporelle plus grande, mais le signal basse résolution spatiale peut-il être interprété?

I-2.3. Le signal basse résolution spatiale

Les acquisitions quotidiennes acquises par les capteurs basse résolution spatiale (exemple NOAA AVHRR) permettent d'avoir un suivi des conditions de développement et de croissance d'un couvert végétal. Si l'on élimine les acquisitions correspondant à des jours où la couverture nuageuse est importante, la fréquence des observations en ciel clair est environ d'une par semaine. Cette fréquence est donc supérieure à celle obtenue avec des capteurs haute résolution spatiale. Le couplage modèles/observations satellitaires n'a d'intérêt que si le signal radiométrique peut permettre de détecter les changements rapides de certains processus, comme le début de la croissance, ainsi que des accidents climatiques, comme une sécheresse, qui ont un impact important sur l'estimation de la

production. Une fréquence temporelle permettant ce degré de précision est difficilement obtenue avec des capteurs haute résolution spatiale.

Cependant, le paysage agricole est souvent une mosaïque composée de divers types de végétation. Chaque parcelle a une taille bien inférieure à la résolution nominale d'AVHRR au nadir (1.1 km). Ainsi, le signal mesuré résulte de la combinaison de divers signaux correspondant à divers types de végétation ou cultures. Généralement, l'occupation du sol est connue, il est possible de l'obtenir si l'on dispose de quelques images haute résolution spatiale réparties au cours de l'année. La difficulté est de pouvoir retrouver les signatures spectrales de chaque composante.

L'utilisation de séries temporelles de mesures issues de capteurs basse résolution spatiale exige de pouvoir interpréter correctement ce signal. Deux approches sont envisageables : (i) on peut décomposer le signal basse résolution pour extraire les signaux temporels relatifs à chaque type de végétation, (ii) on peut recomposer le signal du pixel observé par le capteur.

a) Décomposition du signal mixte

décomposition spatiale

On suppose que l'inter-variabilité observée entre les pixels AVHRR est principalement due à une différence d'occupation du sol d'un pixel à l'autre, la signature de chaque composante étant stable. Divers auteurs (Puyou-Lascassie *et al.*, 1994; Kerdiles and Grondana, 1994; Faivre and Fischer, 1995) ont mis au point des modèles plus ou moins complexes permettant de retrouver les profils temporels de réflectance des diverses composantes.

décomposition temporelle

Un modèle semi-empirique décrit la forme du profil temporel observé à l'échelle régionale pendant un cycle annuel. Différents jeux de paramètres permettent de décrire les profils saisonniers des principales composantes. Le profil régional est la somme des divers profils individuels pondérés par leur pourcentage relatif d'occupation du sol (Fischer, 1994).

La décomposition spatiale nécessite de connaître la composition de chaque pixel, pour la décomposition temporelle, seule la composition globale (à l'échelle de la région)

est nécessaire. En revanche, on peut appliquer la méthode de décomposition spatiale à une seule image basse résolution, alors qu'il faut des images au cours de toute la saison végétative pour utiliser la méthode de décomposition temporelle.

b) Reproduction du signal mixte

Plutôt que de chercher à décomposer le signal observé à basse résolution, on cherche ici à reproduire l'observation. Cette approche a été testée en utilisant un modèle mécaniste pour simuler la contribution de la culture principale d'une région, et des profils empiriques pour les composantes minoritaires. La mise en oeuvre de cette approche faisant partie intégrante des travaux effectués au cours de cette Thèse, la démarche sera détaillée plus loin. Le profil temporel radiométrique observé par le capteur NOAA AVHRR ayant été grossièrement reproduit, il est envisageable d'appliquer le concept d'"assimilation" précédemment décrit en utilisant des observations basse résolution spatiale.

Cette démarche possède deux avantages. Premièrement, il n'est pas nécessaire de connaître la composition exacte de chaque pixel, seule la surface représentée par chaque type de végétation à l'échelle du site étudié doit être disponible. Deuxièmement, la mise en oeuvre de cette technique n'exige pas que l'on ait plusieurs acquisitions, bien que ce soit préférable puisque l'on souhaite reproduire l'évolution saisonnière du couvert.

I-3. DEMARCHE PROPOSEE

I-3.1. Schéma général

Les variables radiatives simulées et observées peuvent être comparées soit au sommet de l'atmosphère ou au niveau du couvert végétal après avoir pris en compte les corrections atmosphériques des mesures satellitaires. Dans le cadre de cette étude, nous simulons les variations temporelles du signal radiométrique satellitaire au sommet du couvert végétal (fig. I-7). Le signal radiométrique temporel a été simulé par le couplage d'un modèle de transfert radiatif avec un modèle de croissance de culture. L'évolution du couvert végétal a été considérée fiable lorsque les modèles couplés reproduisent les observations de réflectances du couvert.

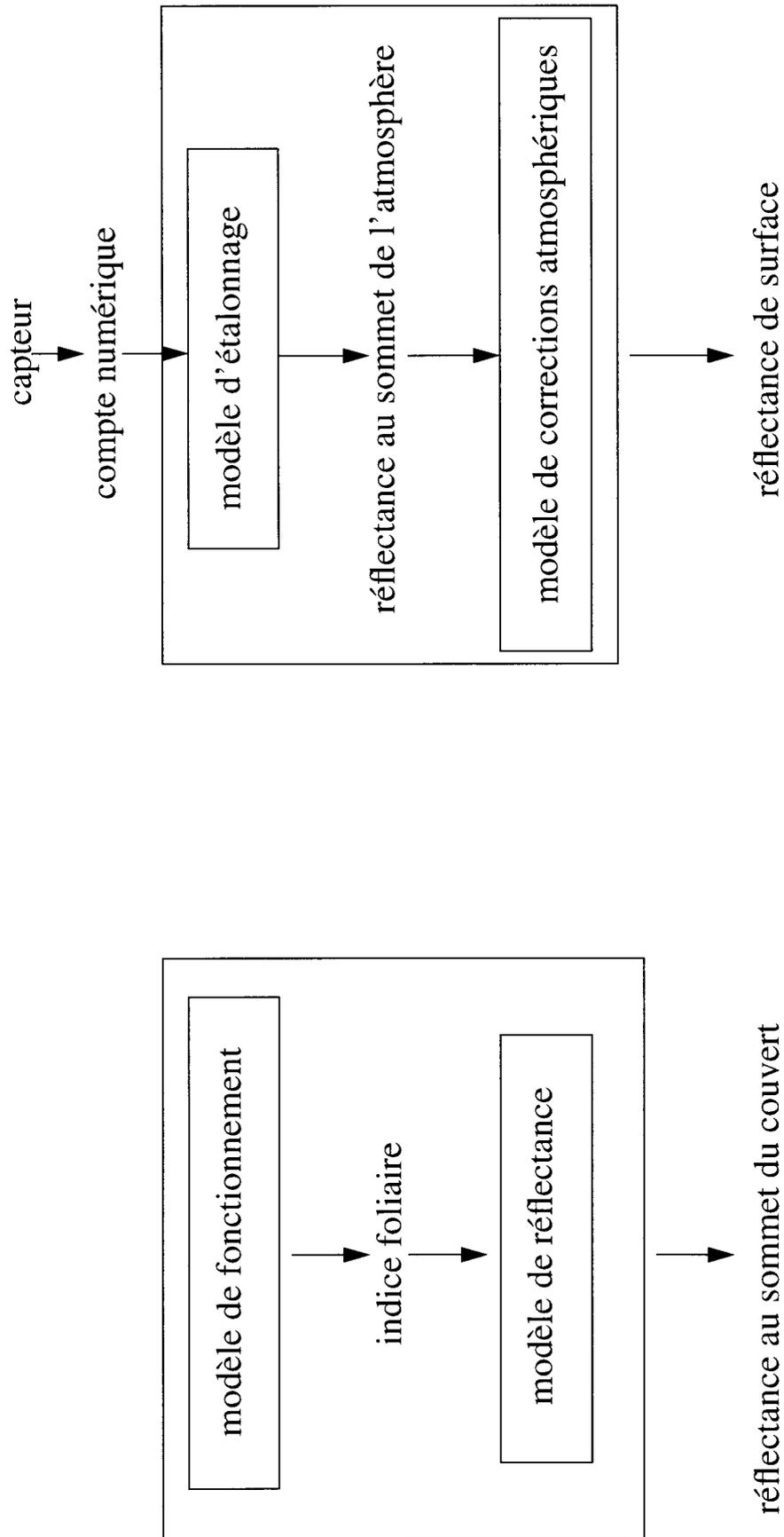


Figure I-7 : Schéma général de la modélisation de la réflectance du couvert et du calcul de la réflectance de surface à partir d'observations satellitaires.

Cette étude concerne à la fois l'échelle de la parcelle et l'échelle régionale. On prédit les profils temporels haute résolution spatiale (échelle de la parcelle) des réflectances du couvert dans les bandes de longueurs d'onde SPOT HRV. Les réflectances prédites pour plusieurs parcelles ont été comparées avec des réflectances télédéteectées pour quelques dates au cours de deux saisons culturales. Dans un second temps, les observations sont utilisées pour contraindre le modèle, selon la technique d'assimilation précédemment décrite. Dans un troisième temps, l'intérêt d'utiliser des données basse résolution spatiale (échelle régionale), pour étudier le développement saisonnier du couvert, est évalué. Dans ce but, les réflectances à l'échelle de la résolution spatiale de NOAA AVHRR ont été simulées.

I-3.2. Modèles et mesures

a) La modélisation du couvert végétal

Les modèles de fonctionnement

Les données satellitaires fournissent une information globale et continue permettant l'étude du comportement saisonnier de la végétation et des flux d'énergie. Cependant, comme l'information radiative ne donne pas directement accès aux mécanismes biophysiques, on a besoin d'un modèle de fonctionnement de végétation pour décrire les échanges de matière et d'énergie de la végétation avec le sol et l'atmosphère. Comme des variables du modèle qui caractérisent le couvert végétal (comme l'indice foliaire, des paramètres de structure et les propriétés optiques de la feuille) apparaissent dans le bilan radiatif, les données télédéteectées peuvent être utilisées pour suivre le développement du couvert végétal.

Les modèles de fonctionnement simulent les principaux processus du développement et de la croissance des plantes. Ils prédisent en particulier le calendrier phénologique, l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif, la conversion du carbone fixé par la plante en matière sèche. La plupart des modèles gèrent les besoins en azote et en eau de la plante. Ainsi, dans des conditions environnementales et des pratiques culturales

données, ces modèles prédisent le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la plante et la surface foliaire à un pas de temps constant (généralement quotidien).

Les modèles de transfert radiatif d'un couvert végétal dans le domaine optique

Un couvert végétal est un système complexe en terme d'agencement, d'orientation et de distribution de ses divers constituants (feuilles, branches ...). Les interactions entre ces éléments et les radiations électromagnétiques sont multiples et difficiles à spécifier en terme de paramètres électromagnétiques. Il existe diverses approches pour modéliser le transfert radiatif dans un couvert végétal que l'on peut répartir en quatre catégories (Goel, 1988).

(a) Pour les modèles géométriques, le couvert est considéré comme une surface sur laquelle sont disposés de façon définie, des objets de forme géométrique, dimension et propriétés optiques données. Cette approche est plus particulièrement destinée aux végétations clairsemées.

(b) Dans le cas des modèles de milieu turbide (basés sur l'équation du transfert radiatif), les éléments de la végétation sont traités comme de petites particules absorbantes et diffusantes, de propriétés optiques données, distribuées aléatoirement dans des couches horizontales et orientées dans des directions données. Ce type de modélisation est plutôt adapté aux couverts denses.

(c) En ce qui concerne les modèles hybrides, la macrostructure du couvert est approximée par un modèle de type géométrique, dont les éléments sont des particules absorbantes et diffusantes, la diffusion multiple n'est plus négligée. Ces modèles sont complexes et concernent les couverts ni denses, ni clairsemés (densité moyenne).

(d) Enfin, dans le cas des modèles de simulations numériques, les interactions du rayonnement avec le couvert sont simulés numériquement (lancer de rayons, radiativité), cette méthode est coûteuse en temps de calcul.

Différents types de modèles ont été développés dans le but de reproduire un signal radiométrique observé [voir les revues de Goel (1988) et Myneni and Ross (1991)].

b) La mesure acquise par satellite

Les capteurs

Dans le domaine du spectre solaire, il existe des capteurs de différentes résolutions temporelles et spatiales. Nous utiliserons ici les données issues de 2 capteurs : le capteur SPOT HRV (Haute Résolution Visible) et le capteur NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

(i) Le capteur SPOT HRV

Le satellite a une orbite circulaire, quasi-polaire, héliosynchrone et phasée (période de 101.4 mn), son altitude à l'équateur est de 822 km. SPOT effectue un peu plus de 14 révolutions par jour (14.19). En 26 jours, il fait un nombre entier de révolutions. Ce capteur possède 2 types de bandes spectrales (multispectral et panchromatique) rappelées dans le tableau I-1. Nous utiliserons uniquement le mode multispectral.

canal	intervalle spectral
XS1 (vert)	0.50-0.59 μm
XS2 (rouge)	0.61-0.68 μm
XS3 (PIR)	0.79-0.89 μm
panchromatique	0.51-0.73 μm

Tableau I-1 : *Bandes spectrales du capteur HRV embarqué sur SPOT. Les bandes spectrales XS1, XS2 et XS3 correspondent au mode multispectral.*

La dimension du pixel est de 20 m x 20 m, le nombre de pixels par ligne 3000, la largeur de bande observée 60 km. Le satellite SPOT offre la possibilité de faire varier la direction de l'observation à plus ou moins 27° par rapport à la verticale du satellite (visée oblique), ceci permet d'augmenter le nombre d'acquisitions au dessus d'un site donné.

(ii) Le capteur NOAA AVHRR

Les satellites météorologiques NOAA sont en orbite polaire, héliosynchrone. AVHRR a un champ de vue instantané correspondant à une résolution au sol d'environ 1.1 km au nadir, le champ de prise de vue s'étend de +/- 55.4° de part et d'autre du nadir (2240 km). Le capteur AVHRR possède 5 bandes spectrales (tableau I-2).

canal	intervalle spectral
1 (visible)	0.58-0.68 μm
2 (PIR)	0.725-1.10 μm
3 (moyen IR)	3.55-3.93 μm
4 (IR thermique)	10.2-11.3 μm
5 (IR thermique)	11.5-12.5 μm

Tableau I-2 : *Bandes spectrales du capteur AVHRR embarqué sur NOAA.*

Le cycle orbital est de 9 jours. Chaque point du globe peut être observé au moins une fois/jour aux alentours de 14 heures locales (et 2h00) mais sous des angles différents (tous les 9 jours sous le même angle).

La résolution effective du radiomètre dépend donc de l'angle de visée (1.1 km au nadir et 3.5 km en bord de champ). Différents types de données sont disponibles : données enregistrées à bord avec une résolution de 1.1 km (LAC), ou de 4 km (GAC), données acquises par une station de réception avec une résolution de 1.1 km (HRPT).

Le signal radiométrique

(i) L'étalonnage

En sortie du capteur, le signal électrique est numérisé, on dispose alors d'une information sous forme de compte numérique. Il faut ensuite étalonner ces comptes numériques pour déduire une luminance équivalente dans la bande spectrale. La relation luminance équivalente/compte numérique est généralement linéaire et est ainsi caractérisée par deux coefficients (coefficient d'étalonnage et offset). Comme la luminance dépend de la hauteur du soleil au moment de la prise de vue, on calcule une réflectance équivalente au sommet de l'atmosphère en tenant compte de l'angle solaire, de l'éclairement solaire équivalent et de la distance Terre-Soleil.

(ii) L'influence de l'atmosphère

Les ondes électromagnétiques sont perturbées lors de leur traversée de l'atmosphère (trajet Soleil-surface et trajet surface-capteur). On distingue principalement 2 phénomènes :

- l'absorption par les molécules de gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène ...) et par les aérosols,

- la diffusion par les molécules (azote, oxygène, c'est à dire la diffusion de Rayleigh) et par les aérosols (diffusion de Mie).

Si l'on se limite à l'influence de l'atmosphère dans le domaine du spectre solaire, la diffusion affecte (modification du contraste des images) principalement les bandes de longueur d'onde (λ) situées dans le visible ($\lambda < 0.7 \mu\text{m}$), l'absorption gazeuse affecte particulièrement le PIR ($\lambda > 0.7 \mu\text{m}$). En raison de leur grande variabilité spatio-temporelle et de leur impact important sur le signal, la vapeur d'eau et les aérosols sont les éléments perturbateurs les plus difficiles à prendre en compte. Les corrections atmosphériques sont le plus souvent effectuées en utilisant des climatologies car on ne dispose pas de mesures d'optique atmosphérique effectuées de façon simultanée avec les acquisitions satellitaires.

I-3.3. Les techniques de couplage modèles/observations satellitaires

a) La simulation directe

On couple le modèle de fonctionnement AFRCWHEAT2 (Porter, 1993) et le modèle de réflectance bidirectionnelle SAIL (Verhoef, 1984) au moyen du LAI quotidiennement prédit par AFRCWHEAT2 pour simuler les réflectances dans les bandes spectrales de SPOT HRV (ou NOAA AVHRR), figure I-8. Les angles solaires et de visée correspondant aux conditions d'acquisitions des observations sont pris en compte pour la simulation des réflectances bidirectionnelles.

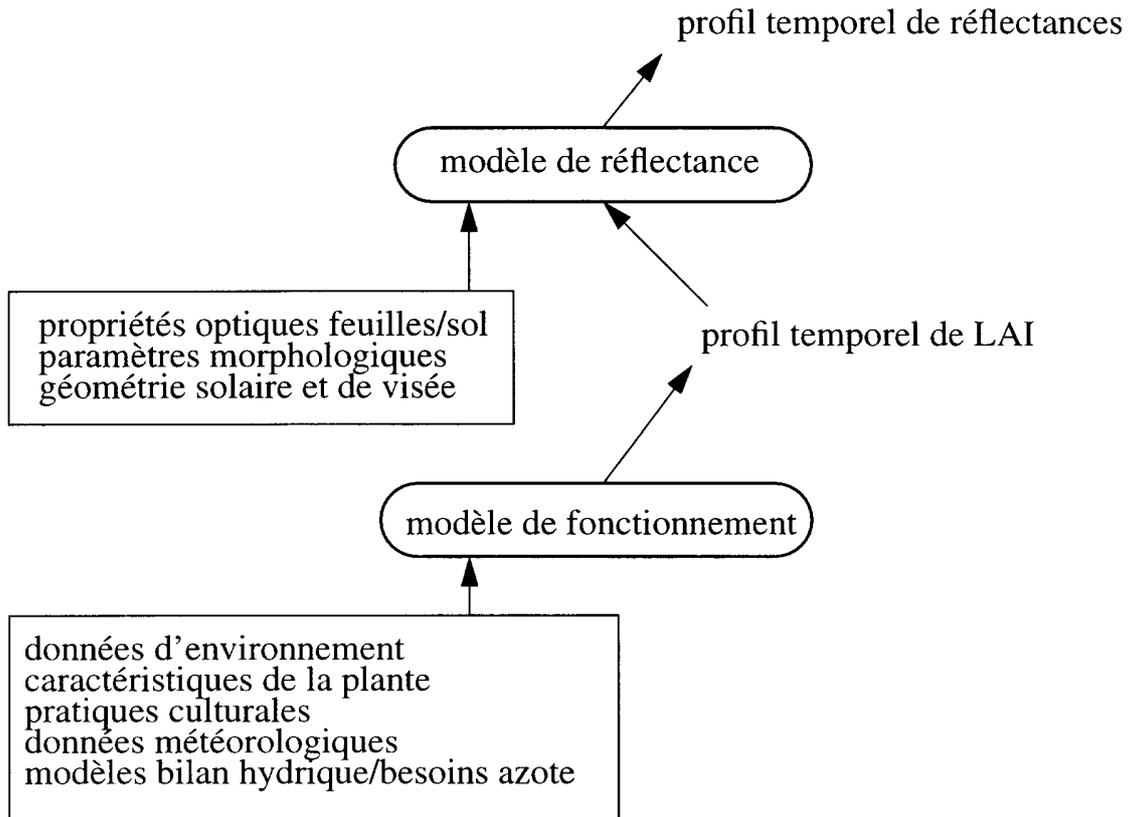


Figure I-8 : Méthode de simulation des profils temporels de réflectances, en utilisant un modèle de fonctionnement couplé à un modèle de réflectance grâce à l'indice foliaire (LAI).

b) L'inversion

L'utilisation conjointe du modèle de fonctionnement et du modèle de réflectance en utilisant une date de semis initiale, permet d'obtenir un profil temporel de réflectances. Des observations synthétiques ou réelles représentent le jeu de référence des réflectances. On suppose par exemple que la date de semis initiale utilisée est incertaine. On cherche alors la date de semis qui permet de minimiser la fonction coût [éq. (I-1)] et ainsi la différence entre modélisation et observation.

$$J(SD) = \sum_{i=1}^{2n} (\rho_i^{obs} - \rho_i^{mod})^2 \quad (\text{équation I-1})$$

J est la fonction coût pour la date de semis SD , ρ_i^{obs} et ρ_i^{mod} sont les réflectances respectivement observées et modélisées à la date d'acquisition i , dans le visible et dans le PIR, n est le nombre de dates d'acquisition (intégration sur $2n$ car 2 bandes de longueur

d'onde). La date de semis minimisant la fonction coût peut être obtenue (i) en balayant toutes les dates possibles dans une gamme plausible de valeurs et en calculant dans chaque cas la fonction coût, (ii) en utilisant un algorithme de minimisation. Notons ici qu'il n'est pas indispensable d'utiliser un tel algorithme lorsque l'on ajuste seulement un paramètre. L'utilisation d'un algorithme de minimisation est toutefois intéressante dans la perspective d'ajustement de plusieurs paramètres simultanément. Cette procédure (fig. I-9) conduit à l'estimation d'une date de semis ajustée.

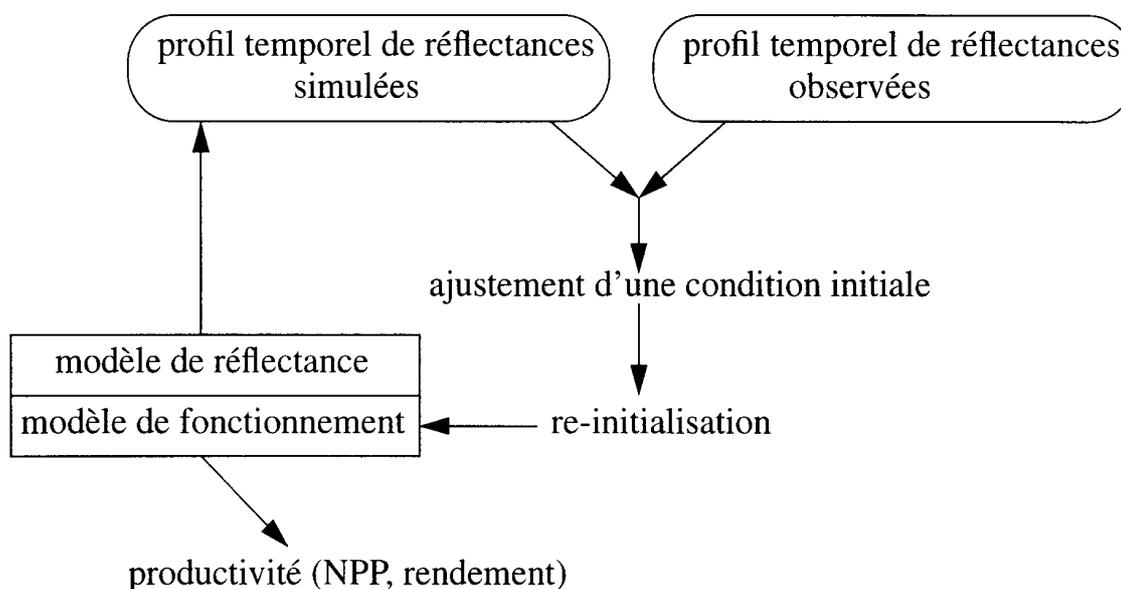


Figure I-9 : Technique d'assimilation d'observations satellitaires. Les observations sont utilisées pour contraindre le profil de réflectances simulées (fig. I-8). Le modèle de fonctionnement est ré-initialisé avec le paramètre retrouvé par minimisation de la différence modèle/observations.

La plupart des processus biophysiques sont décrits grâce à des formules non-linéaires. Les variations des paramètres causent des discontinuités au niveau de la fonction coût, nous sommes ainsi en présence de minima locaux. Nous utiliserons l'algorithme de minimisation décrit par la méthode "simplex" (Matlab, The Math Works, Inc.) qui conduit à des résultats satisfaisants (Jacquemoud *et al*, 1994).

c) La simulation du signal radiométrique à l'échelle régionale

Simulation des profils temporels de réflectances d'une culture à l'échelle régionale

Pour la culture majoritaire (blé d'hiver) sur ce site, on suppose que la dispersion de la date de semis et des variétés sur les sites test est statistiquement représentative de la région. Pour chaque combinaison de date de semis/caractéristiques variétales et pour une année donnée, on a simulé les profils temporels de réflectances dans les bandes de longueur d'onde de SPOT en couplant le modèle de fonctionnement AFRCWHEAT2 au modèle de transfert radiatif SAIL, dans des conditions de visée au nadir. Puis, ces réflectances ont été pondérées par la surface occupée par chaque combinaison date de semis/caractéristiques variétales pour obtenir des profils temporels de réflectances et de NDVI représentatifs de tous les champs de blé de la région.

Simulation des profils temporels de réflectances à l'échelle de la basse résolution spatiale

Afin d'estimer les réflectances à une résolution grossière (4 km), on combine les profils temporels de chaque classe (classification) présente sur la surface, et l'on prend en compte leur pourcentage relatif (fig. I-10).

On suppose que, dans une bande spectrale donnée, la réflectance résultante peut être calculée comme suit :

$$\bar{\rho} = \frac{1}{s} \sum s_i \rho_i \quad (\text{équation I- 2})$$

$\bar{\rho}$: réflectance moyenne sur la surface s , ρ_i : réflectance de la classe i , s : surface totale, et s_i : surface occupée par la classe i .

Ainsi, en considérant la proportion relative des différents types de culture (occupation du sol), les profils temporels de réflectances composites ont été obtenus.

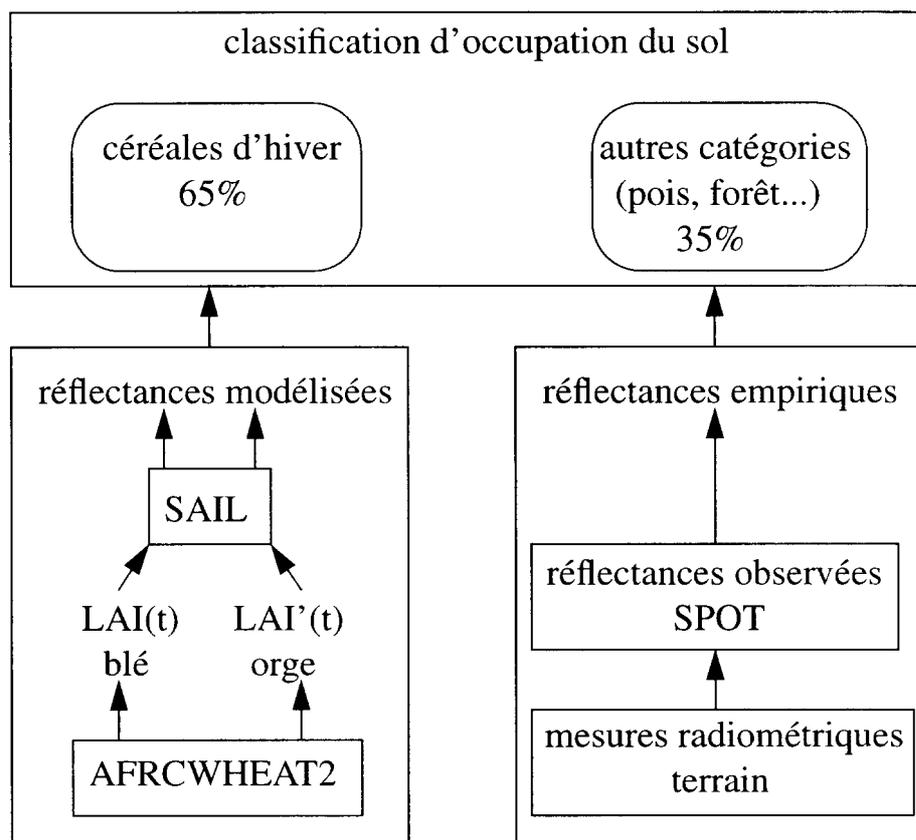


Figure I-10 : Méthode de simulation du signal radiométrique observé à l'échelle régionale (AVHRR). La simulation est obtenue en combinant des profils de réflectances empiriques (pour les classes minoritaires) et des profils de réflectances modélisées (pour les céréales d'hiver).

La démarche utilisée pour le couplage modèle de fonctionnement/observations satellitaires dans le cadre de cette étude ayant été décrite, nous allons au cours du Chapitre suivant décrire les données et modèles utilisés. La sensibilité de ces outils à divers paramètres sera également évaluée.

CHAPITRE II

PRESENTATION DES DONNEES ET DES MODELES

II-1. DONNEES ET MODELES UTILISES

Le principal site d'étude est localisé en Beauce (fig. II-1), la plus grande région française pour la production de blé et d'orge. Toutes les mesures nécessaires à l'étude n'étant pas disponibles sur ce site, nous utilisons également un site localisé en Camargue. Une description détaillée des modèles utilisés est présentée en annexe.

II-1.1. Le site de la Beauce

La zone d'étude est une surface de 40 km par 40 km près de la ville de Chartres (48.5°N, 1.5°E). Pour deux saisons culturales consécutives (1990/1991 et 1991/1992), nous combinons des observations terrain, des observations SPOT HRV de 20 m de résolution (échelle de la parcelle) et des mesures NOAA-11 AVHRR de 4 km de résolution (échelle régionale), un modèle de croissance de culture (AFRCWHEAT2, Porter, 1993), un modèle de transfert radiatif dans le couvert (SAIL, Verhoef, 1984), et un modèle de transmission atmosphérique. Les enquêtes terrain, les observations SPOT et la carte d'occupation des sols ont été obtenus dans le cadre du projet MARS (Action IV) de la CEE mis en oeuvre par le Centre Commun de Recherches d'Ispra (Sharman et Boissezon, 1992). Plus de détails concernant chacun de ces outils vont suivre.

a) Données satellitaires

Des données haute résolution spatiale acquises par SPOT HRV sont utilisées pour l'étude à l'échelle de la parcelle, alors que les mesures à basse résolution spatiale enregistrées par NOAA-11 AVHRR sont utilisées pour l'approche à l'échelle régionale. Nous avons travaillé avec des images de réflectances : les comptes numériques bruts ont été convertis en luminances en utilisant des coefficients d'étalonnage, et les réflectances ont été calculées en tenant compte de la distance Terre/Soleil, de l'angle zénithal solaire, et de la constante solaire.

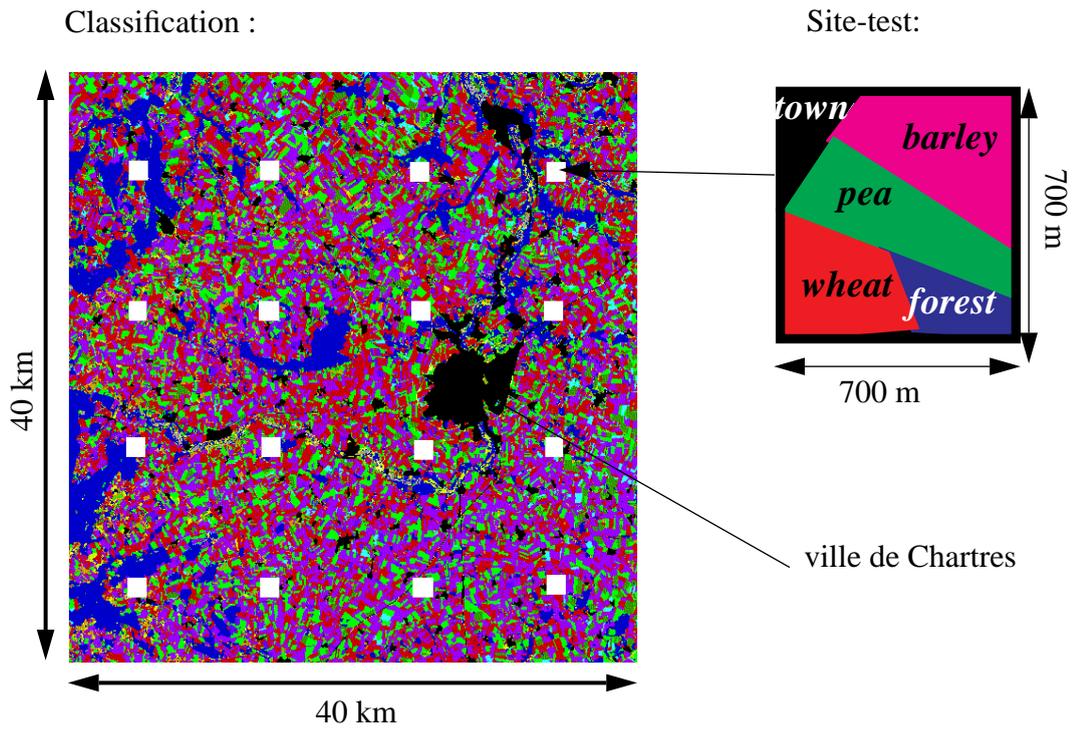
Haute résolution spatiale

Pour deux années consécutives (1991 et 1992), des données SPOT HRV sont disponibles pour des jours de ciel clair pendant la période d'activité du blé d'hiver. On dispose de 2 scènes en 1991 et 5 scènes en 1992. Ces données ont été étalonnées (Henry *et al.*, 1995) et corrigées des effets atmosphériques (Rahman et Dedieu, 1994), en utilisant des valeurs moyennes mensuelles pour la vapeur d'eau (Oort, 1983) et l'ozone (London et al., 1976). Une épaisseur optique d'aérosol constante, 0.2 à une longueur d'onde de 550 nm, a été utilisée. L'erreur sur la réflectance mesurée due à l'étalonnage et aux effets atmosphériques est évaluée à 0.02.

Les premières images ont été acquises en avril (10 avril 1991 [jour Julien (jj) 101] et 9 avril 1992 [jj 100]) et correspondent au début de la période de croissance des céréales d'hiver. Les dates de mai (24 mai 1991, jj 145 et 13, 18 et 19 mai 1992, jjs 134, 139, et 140) concernent le plein développement de la végétation, et la dernière date (19 juillet 1992, jj 201) arrive après la récolte. Dans le tableau II-1, les angles d'acquisition, qui sont pris en compte pour la modélisation des réflectances, sont présentés.

date d'acquisition	angle zénithal de visée	angle azimutal de visée	angle zénithal solaire	angle azimutal solaire	azimut relatif
10 avril 1991	30.4	107.0	41.3	169.0	-62.0
24 mai 1991	29.7	279.2	31.1	147.3	131.9
09 avril 1992	6.6	104.0	42.2	162.6	-58.6
13 mai 1992	16.8	105.3	30.9	163.0	-57.7
18 mai 1992	22.7 (53.54)	106.2	29.6 (34.79)	164.7	-58.5 (-154.86)
19 mai 1992	4.3 (40.62)	282.6	30.5 (46.39)	155.4	127.2 (15.05)
19 juillet 1992	30.3	100.8	29.8	162.6	-61.8

Tableau II-1 : Angles d'acquisition des données SPOT HRV, en degrés, pendant la période d'activité des céréales d'hiver, en 1991 et 1992. Les angles d'acquisition des données NOAA AVHRR sont mentionnés entre parenthèses pour 2 jours. Site Beauce.



Scènes SPOT HRV:

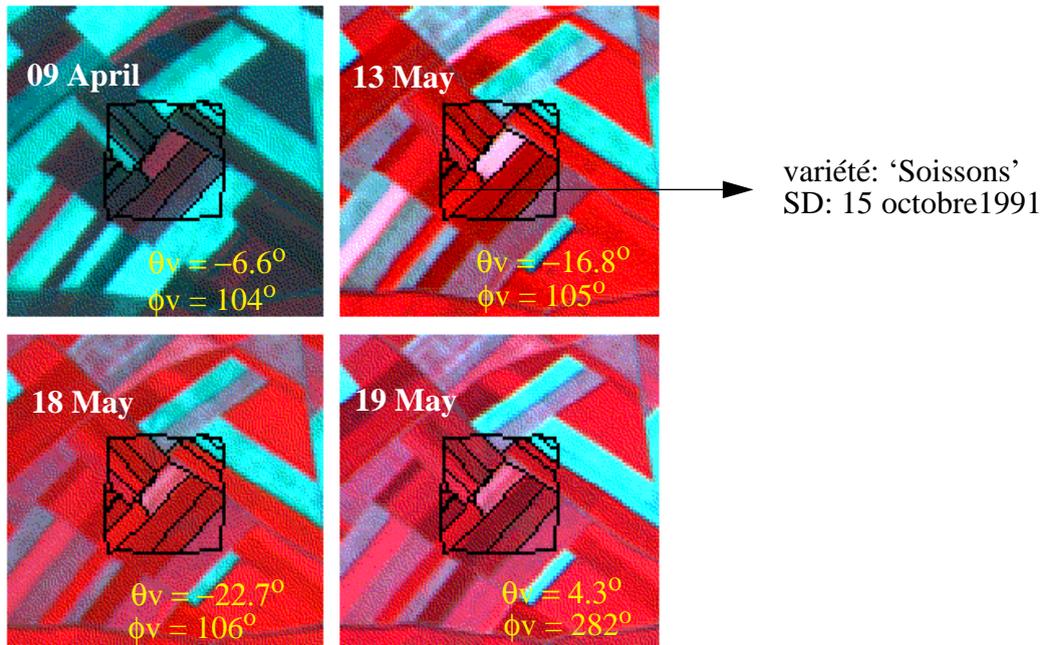


Figure II-1 : Localisation du principal site d'étude, Beauce 1992, France.

Les 3 scènes acquises sur une période de 6 jours en 1992 nous permettent de constater l'impact des effets angulaires pendant cette période.

Basse résolution spatiale

Les archives temporelles de mesures quotidiennes (après-midi) NOAA AVHRR (HRPT) dans les canaux visible et PIR au cours de l'année 1992 ont été reçues et archivées au Centre de Météorologie Spatiale à Lannion en France. Le pré-traitement est décrit par Derrien *et al.*, (1992). Il s'agit de l'ajustement automatique de la navigation AVHRR (Bordes *et al.*, 1992), d'une réorganisation des données par projection stéréographique à une résolution horizontale de 4 km, et d'un étalonnage des réflectances en utilisant les coefficients de Kaufman (Kaufman et Holben, 1993) à la place des valeurs pré-vol. Enfin, une correction atmosphérique est appliquée aux réflectances en utilisant des abaques calculées par l'algorithme de transfert radiatif dans l'atmosphère 5S (Tanré *et al.*, 1990). Les corrections appliquées tiennent compte de la diffusion Rayleigh et de l'absorption des gaz dont la teneur est obtenue soit par radiosondages pour la vapeur d'eau (ou climatologie par défaut), soit par une climatologie pour l'ozone. Il n'y a pas de correction pour les effets des aérosols. Principalement à cause des nuages, environ 20% des journées d'acquisition ont fourni des données utilisables de janvier à octobre.

b) Données biologiques

On dispose d'un suivi hebdomadaire de LAI vert sur une parcelle de blé d'hiver de variété Soissons, semée le 17 octobre 1991 dans la région de Grignon, en conditions non limitantes en azote (M.H. Jeuffroy, INRA Grignon).

Un prélèvement de 2 placettes (2 rangs x 50 cm), sur 3 blocs (6 répétitions) est effectué (0.175 m² par placette). Dix tiges sont prélevées dans la strate dominante du couvert. La surface foliaire des feuilles par strate est mesurée à l'aide d'un planimètre, cette surface est ramenée à une surface de sol. On ajoute alors les surfaces foliaires de chaque strate pour obtenir un LAI.

Les données météorologiques de la station de Grignon sont également disponibles.

c) Occupation du sol

Des informations relatives à l'occupation du sol sont disponibles sur la zone d'étude de 40 km par 40 km, pour 1991 et 1992. Une interprétation des images SPOT, que l'on appellera classification dans la suite du texte, a été effectuée (SOTEMA, Toulouse) pour fournir une information concernant les divers types de végétation présents dans la région.

L'approche à l'échelle de la parcelle

Une enquête effectuée en 1991 et 1992 par les services agricoles sur 16 zones (segments) de 700 m par 700 m, distribuées sur la région, fournit la taille des parcelles, les espèces des cultures, le nom des variétés, la date de semis, et le rendement estimé par l'agriculteur. La distribution des dates de semis et des différentes variétés de blé est représentées sur la figure II-2 pour l'année 1992.

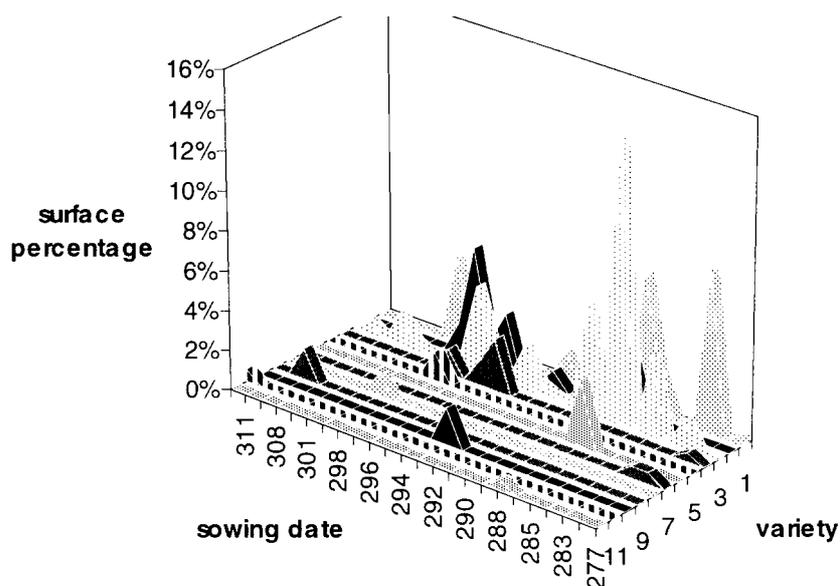


Figure II-2 : Distributions des dates de semis et des variétés du blé d'hiver, en pourcentage de surface au sol sur les 16 sites test (0.7 km x 0.7 km). Site Beauce 1992.

Il y a 38 combinaisons de date de semis/caractéristiques variétales pour 1991 et 48 pour 92. Quatre des parcelles enquêtées (PA, PB, PC, et PD) seront plus spécifiquement étudiées pour l'approche inter-annuelle (tableau II-2).

	1991			1992		
	Psat	Vsat	date de semis	Psat	Vsat	date de semis
PA	20	30	296 (23/10/90)	20	30	301 (28/10/91)
PB	20	35	296 (23/10/90)	20	30	288 (15/10/91)
PC	20	40	278 (5/10/90)	18	40	288 (15/10/91)
PD	16	35	298 (25/10/90)	18	40	296 (23/10/91)

Tableau II-2 : *Caractéristiques variétales des champs étudiés. Psat et Vsat sont des paramètres du modèle AFRCWHEAT2. Psat et Vsat prennent respectivement en compte la photopériode et la vernalisation.*

Des mesures terrain (visite hebdomadaire) effectuées sur la même région (SCEES, 1985) dans des conditions climatiques et de phasage temporel proches sont disponibles. Ce sont des mesures radiométriques (réflectances) de terrain pour les années 1983 et 1984 pour chaque classe présente sur cette zone, et le profil temporel de la couverture fractionnaire de la végétation (τ) pour 1983, estimé à partir de photographies numérisées.

L'approche à l'échelle régionale

La classification comporte 13 classes : 12 catégories de végétation et une regroupant toutes les autres catégories (ville, surface d'eau, routes), (fig. II-3 pour 1992).

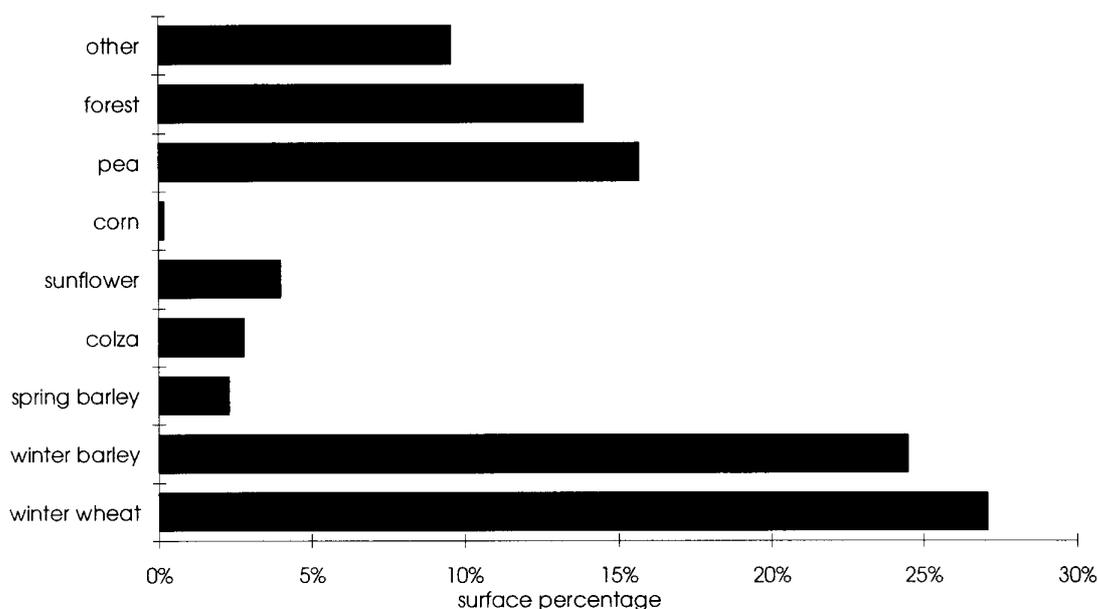


Figure II-3 : *Pourcentage de la surface occupée par chaque classe de végétation. Site Beauce 1992, zone de 40 km x 40 km.*

Elle a été obtenue par la méthode du maximum de vraisemblance, en utilisant les images SPOT de 20 m x 20 m de résolution et des vérités terrain issues du suivi. Pour 1991 et 1992, les céréales d'hiver (blé et orge) sont dominantes dans cette région (40 km x 40 km), (52% de la surface totale du site en 1992).

En 1991 (1992), les parcelles de blé étaient distribués sur 29% (27%) de la surface de la région, les 60 (128) parcelles enquêtées représentaient 5165 (6743) pixels de 20 m x 20 m, c'est à dire, environ 2 km² (2.7 km²), il y avait 12 (13) variétés et les dates de semis étaient étalées sur une période de 43 (38) jours. Les figures II-4 et II-5 montrent la distribution des dates de semis et des caractéristiques variétales des parcelles enquêtées, pour deux années.

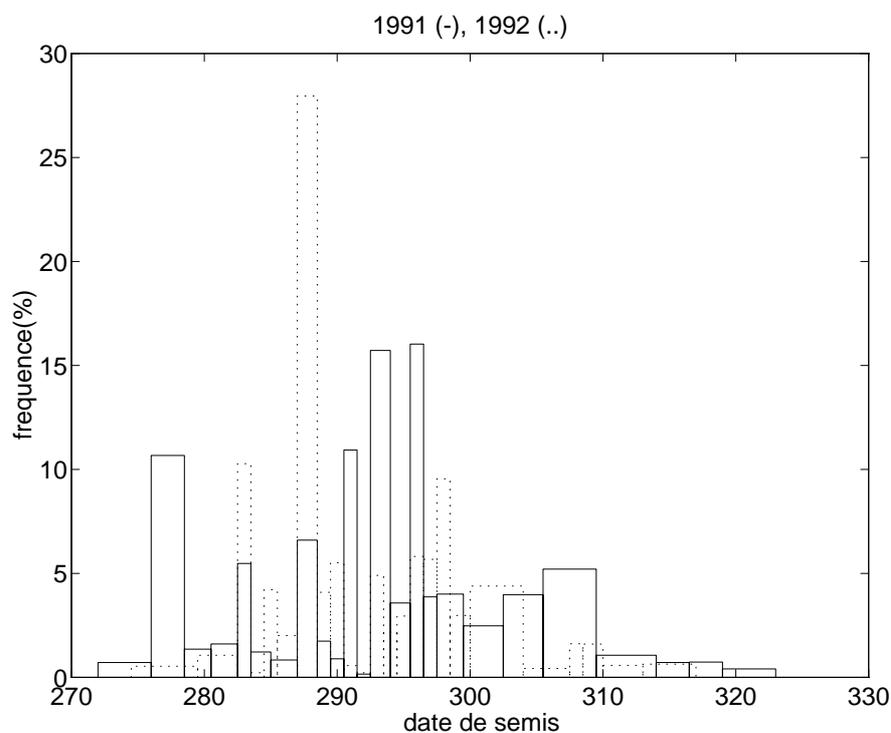


Figure II-4 : Distribution des dates de semis du blé d'hiver, en pourcentage de surface au sol sur les 16 sites test (0.7 km x 0.7 km). Site Beauce 1991 (-) et 1992 (..).

Les variétés qui sont décrites par les mêmes valeurs de paramètres du modèle de culture ont été regroupées.

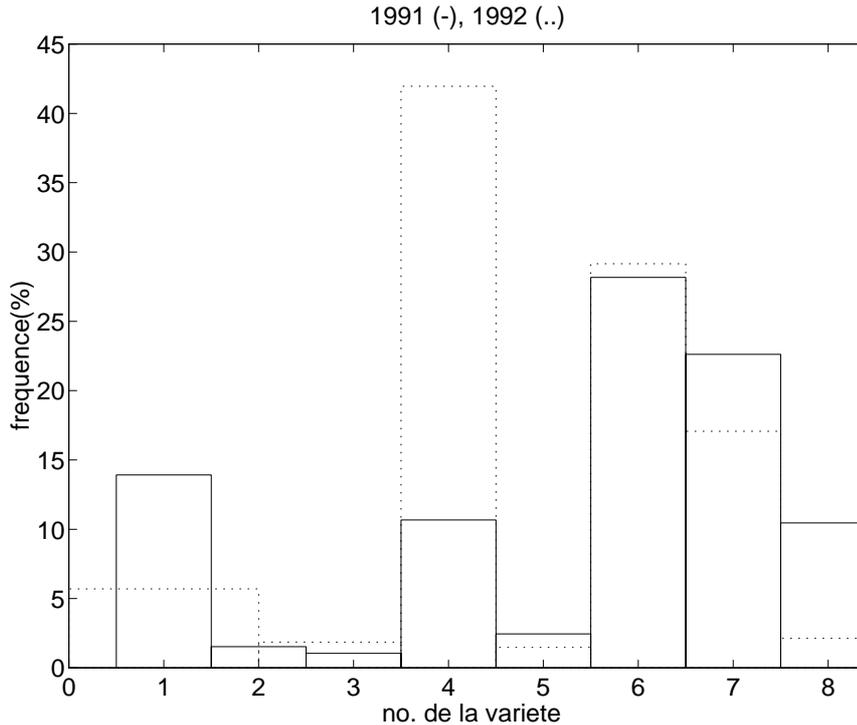


Figure II-5 : Distribution des variétés de blé d'hiver, en pourcentage de surface au sol sur les 16 sites test (0.7 km x 0.7 km). Pour chaque configuration, les paramètres P_{sat} et V_{sat} du modèle AFRCWHEAT2 sont successivement 1 : (16, 35), 2 : (18, 20), 3 : (18, 35), 4 : (18, 40), 5 : (20, 20), 6 : (20, 30), 7 : (20, 35), 8 : (20, 40). Site Beauce 1991 (-) et 1992 (..).

Le pourcentage de blé et d'orge d'hiver est plus grand (fig. II-6) pour la partie sud de cette région.

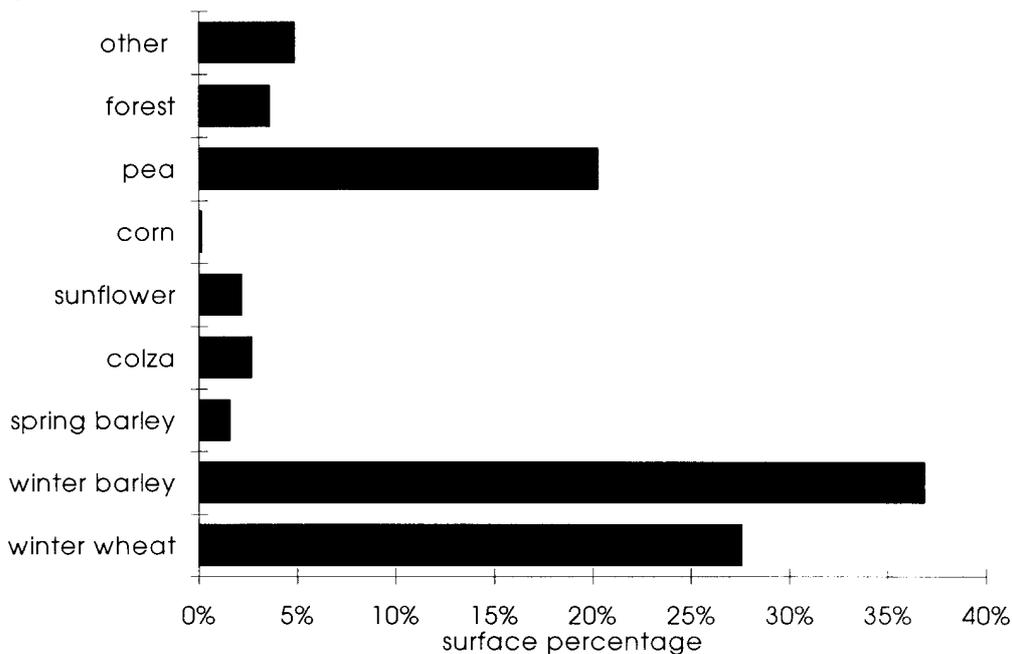


Figure II-6 : Pourcentage de la surface occupée par chaque classe de végétation. Site Beauce 1992, zone de 11 km x 20 km au sud du site.

On a sélectionné une zone de 220 km² (14 pixels AVHRR d'une taille de 4 km x 4 km) où le pourcentage de forêt et de ville est aussi bas que possible et où les cultures sont largement prédominantes. Nous avons utilisé les réflectances moyennées sur ces 14 pixels. Notre étude à l'échelle régionale se limitera à cette zone, où 65% de la surface totale sont représentés par les céréales d'hiver. Les pourcentages de chaque catégorie de la classification sont proches pour les 14 pixels, ceci permet de faire l'hypothèse d'une homogénéité régionale.

II-1.2. Le site de la Camargue

Neuf parcelles (P1 à P10) expérimentales de blé d'hiver étaient localisées dans la plaine alluviale de la Camargue (sud-ouest de la France, 43.5°N, 4.5°E) (Guérif *et al.*, 1988). Les parcelles possèdent des caractéristiques différentes au niveau de la localisation, des antécédents cultureux, de la date de semis et de la variété. Des mesures biologiques et physiques ont été effectuées sur les 9 parcelles, l'expérimentation a été décrite en détail par Jappiot (1987).

a) Mesures biophysiques

Pour chaque parcelle, 10 échantillons de 5 plantes ont été prélevés. Les organes (feuilles, tiges, épis) ont été séparés, ainsi que les parties vertes et jaunes. La surface des organes verts a été mesurée au moyen d'un planimètre. L'indice foliaire (ou LAI pour Leaf Area Index) est le rapport de la surface de feuille ramenée à la surface du sol. Les LAI verts mesurés obtenus pour les 9 parcelles sont présentés figure II-7. On note que ces parcelles présentent des profils de LAI d'allure très différentes (cas des P1 et P10).

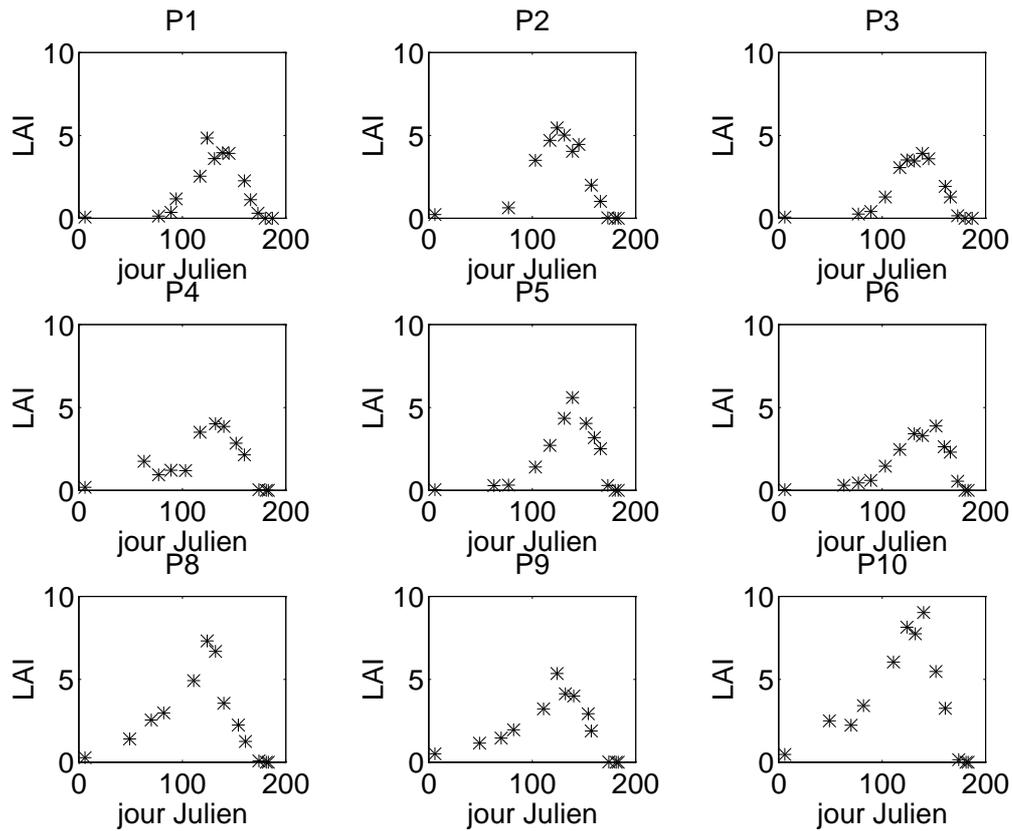


Figure II-7 : Profils temporels de LAI mesurés pour 9 parcelles. Site Camargue 1987.

Les figures II-8 et II-9 montrent des profils temporels de LAI mesurés pour deux variétés avec des dates de semis différentes (P2/P9 et P4/P10). Dans chaque cas, la date de semis influence le phasage temporel du profil de LAI. Toutefois, l'allure du profil Creso 317 (fig. II-9) présente un 'accident' vraisemblablement dû à un autre facteur.

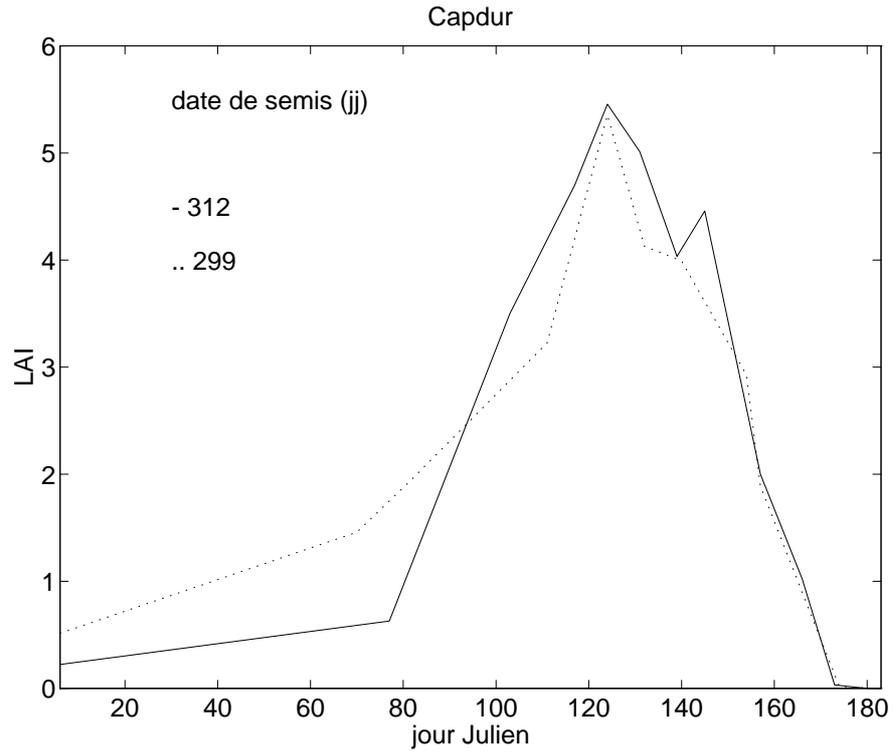


Figure II-8 : Profils temporels de LAI mesurés. Variété Capdur, date de semis jj 312 (P2) et 299 (P9). Site Camargue 1987.

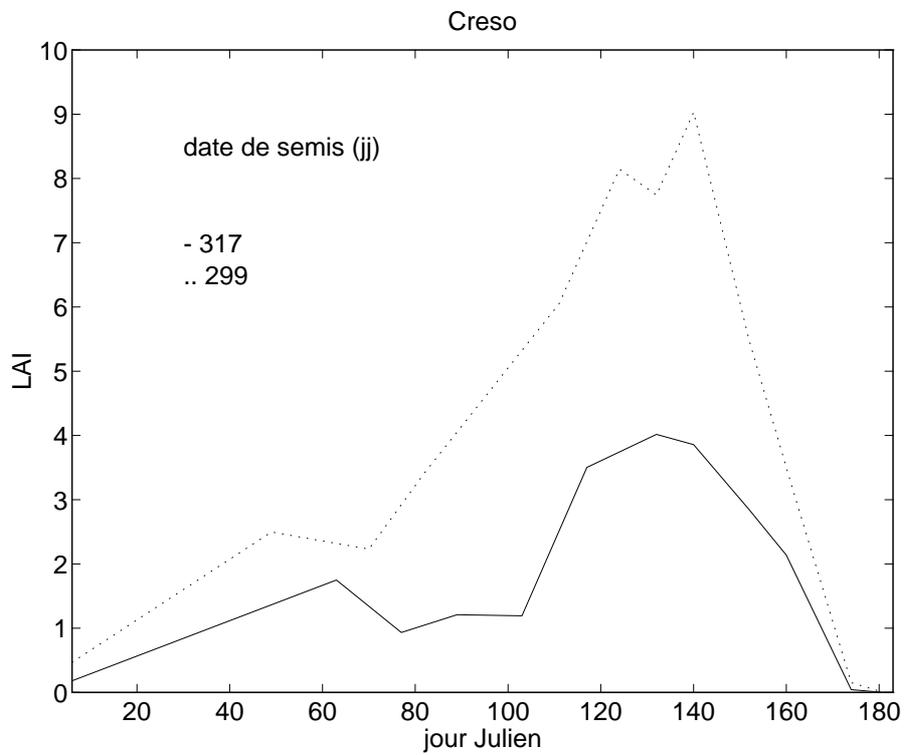


Figure II-9 : Profils temporels de LAI mesurés. Variété Créso, date de semis jj 317 (P4) et 299 (P10). Site Camargue 1987.

b) Mesures radiométriques

Les mesures de réflectance ont été effectuées à 12h00 G.M.T. plus ou moins une heure dans des conditions de ciel clair. Un radiomètre CIMEL a été utilisé, les bandes de longueurs d'onde sont les mêmes que celles du capteur SPOT HRV. On mesure la luminance et l'éclairement au dessus de la plante et au dessus du sol nu (fig. II-10), en visée verticale, simultanément dans les bandes de longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge. Dans une bande de longueurs d'onde donnée, la réflectance est le rapport entre la luminance et l'éclairement.

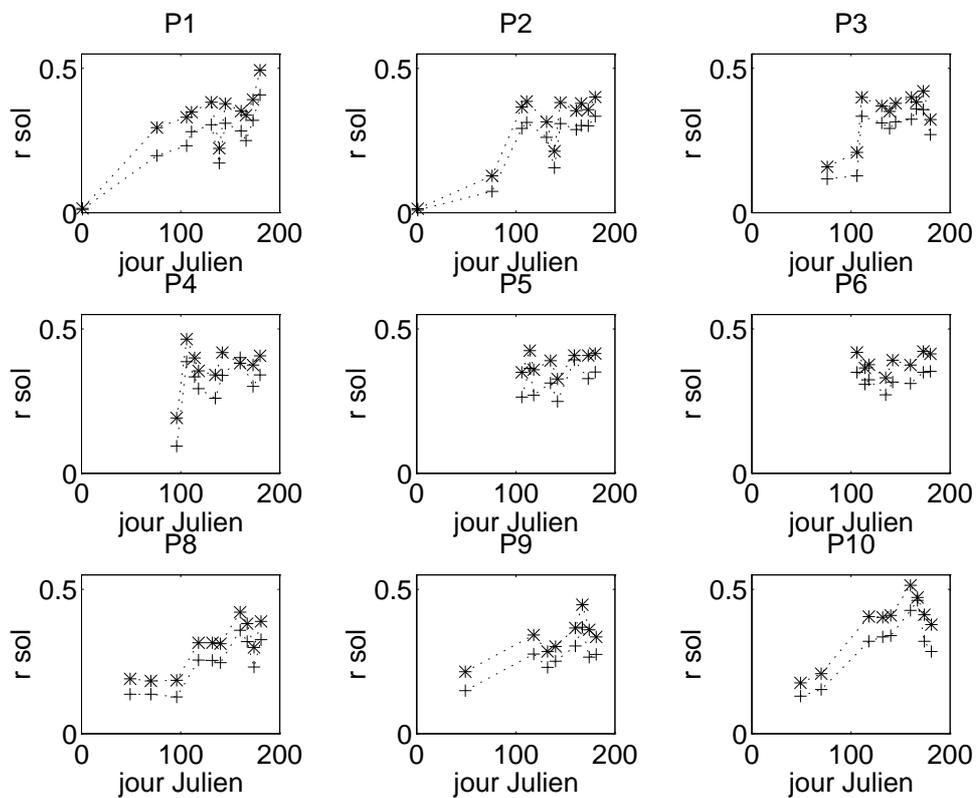


Figure II-10 : Profils temporels des réflectances de sol mesurées dans le visible (+) et dans le canal PIR (*) pour 9 parcelles. Site Camargue 1987.

II-1.3. Le modèle de croissance de culture AFRCWHEAT2

Ce modèle (Porter, 1993), développé pour le blé d'hiver, prédit quotidiennement l'assimilation nette de dioxyde de carbone, la respiration, la distribution des assimilats dans les différents organes de la plante, le développement phénologique, la production nette de matière organique et le rendement en grain (Annexe 1). Les paramètres d'entrée sont les données météorologiques quotidiennes (températures journalières minimum et maximum, le rayonnement solaire, les précipitations, la température du point de rosée, la vitesse moyenne journalière du vent), les données environnementales (latitude, type de sol), certaines pratiques culturales (date et densité de semis) et des caractéristiques de la plante, en particulier la sensibilité à la photopériode (Psat) et à la vernalisation (Vsat). Psat est la photopériode de saturation (en nombre d'heures) d'une variété, c'est à dire la photopériode au-delà de laquelle des heures supplémentaires d'ensoleillement ne sont pas utilisées. Lorsque la photopériode quotidienne est inférieure à Psat, le temps thermique est réduit. Vsat correspond aux degrés-jours de vernalisation accumulés à partir de la germination. Vsat affecte le temps thermique après l'émergence : plus Vsat est faible, plus le temps thermique est réduit. De plus, un modèle de bilan hydrique est intégré et les besoins en azote sont pris en compte par la version d'AFRCWHEAT que nous utilisons. On suppose que les besoins en azote sont remplis, alors que l'éventuel stress hydrique est calculé. Les données météorologiques pour 1990, 1991 et 1992 (fig. II-11) sont fournies par une station proche du site [Boigneville (48.2°N, 2.2°N)].

AFRCWHEAT2 a été validé pour différentes conditions climatiques et spatiales (Semenov *et al.*, 1993). En conséquence, pour la région de la Beauce, qui est une zone agricole bien connue avec des conditions climatiques proches des conditions de validation de Semenov *et al.* (1993), on considère que la photosynthèse est correctement simulée.

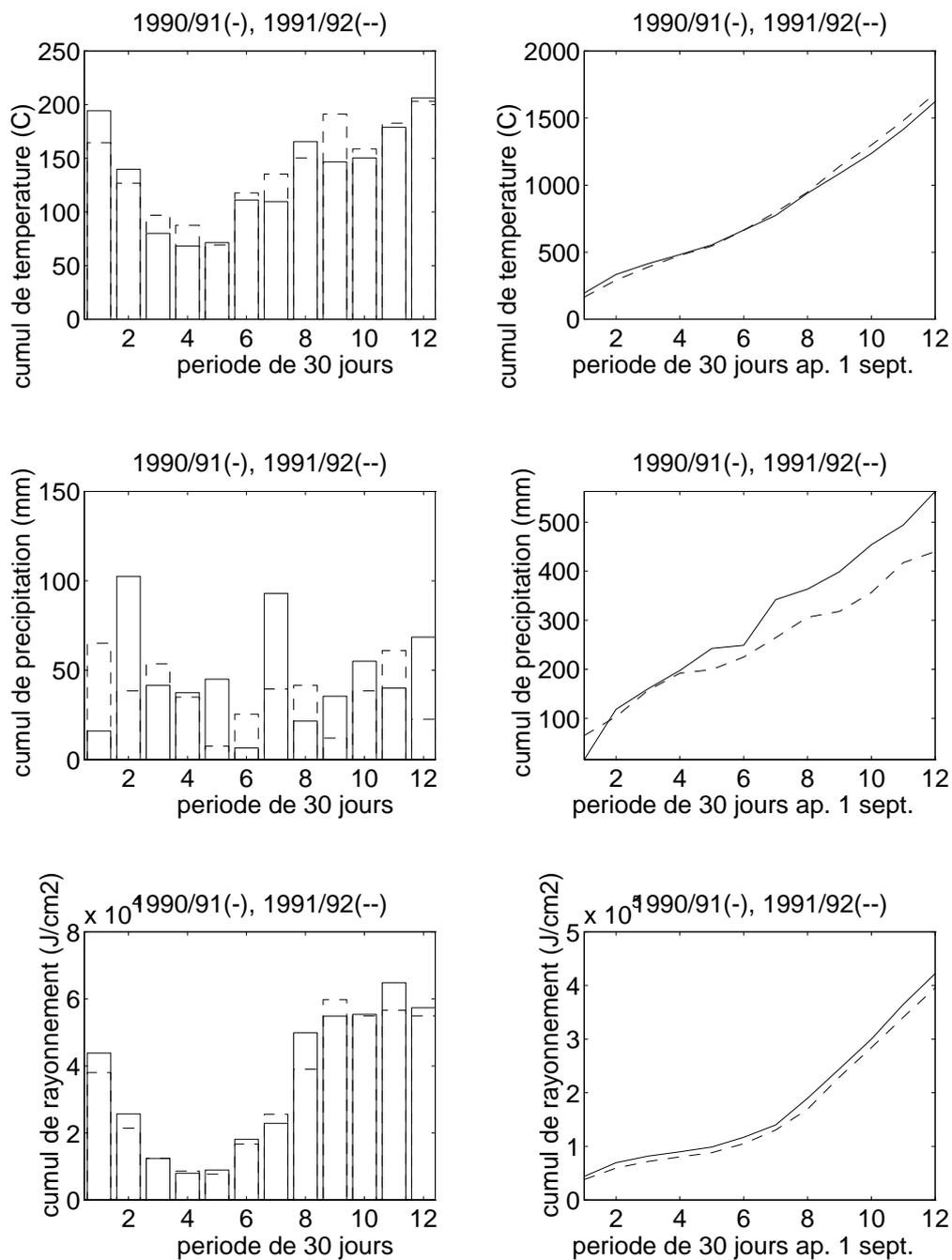


Figure II-11 : Conditions météorologiques pour la station de Boigneville en 1990/1991 (-) et 1991/1992 (--). Valeurs cumulées de températures moyennes journalières de l'air (a, b), de précipitations (c, d) et de rayonnement solaire (e, f). L'échelle de temps (périodes de 30 jours) commence le 1er septembre.

En revanche, il est nécessaire d'estimer avec précision, les paramètres du modèle relatifs aux propriétés de la plante, comme sa sensibilité à la photopériode, ou aux conditions de croissance, comme la date de semis, pour simuler la phénologie de la plante, et ensuite la production. Le modèle prédit également l'indice foliaire vert (LAI) du couvert qui permet le lien avec un modèle de transfert radiatif dans le couvert végétal.

II-1.4. Les modèles de réflectance

On présente ici un modèle semi-empirique (Baret, 1988) et 3 modèles décrivant le transfert radiatif dans un couvert homogène (la végétation est assimilée à un ensemble de particules dans un milieu turbide) selon 3 approches différentes (Annexe 1) : (i) le modèle SAIL (Verhoef, 1984) utilisant la théorie de Kubelka and Munk (1931) (approximation à 4 flux, milieu plan parallèle), (ii) modèle discret EXTRAD (Goudriaan, 1977) dans lequel le couvert est divisé en un nombre fini de couches pour lesquelles les flux ascendants et descendants sont calculés, et (iii) le modèle Nilson-Kuusk (1989) dans lequel l'équation du transfert radiatif est résolue (calcul des fonctions de phase de diffusion du rayonnement par les feuilles).

a) Le modèle de Baret (1988)

L'objectif est ici de proposer un modèle simplifié de réflectance directionnelle verticale (au nadir) d'un couvert végétal (Baret, 1986) en simplifiant au maximum le formalisme mathématique des modèles de transfert radiatif. La réponse radiométrique d'une culture dépend de divers paramètres qui seront pris en compte par ce modèle. La réflectance est tout d'abord conditionnée par un ensemble de critères caractérisant le couvert : l'indice foliaire, l'orientation des feuilles et les propriétés optiques des feuilles (réflectance, transmittance). Elle dépend également de paramètres externes au couvert : la position du soleil ainsi que les propriétés optiques du sol.

b) Le modèle SAIL (Verhoef, 1984)

Le modèle SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef, 1984) est une généralisation du modèle Suits (1972) qui calcule la réflectance dans la direction du capteur comme une fonction des paramètres du couvert et des angles d'acquisition et solaires. L'orientation des feuilles (distribution elliptique) est représentée par une fonction discrète de la distribution des angles d'inclinaison des feuilles. La version utilisée (F. Baret, INRA Avignon) prend en compte le hot-spot du couvert tel qu'il est décrit par Kuusk (1991a).

c) Le modèle EXTRAD (Goudriaan, 1977)

De Wit a initialement développé un modèle pour simuler l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif des cultures (1965), qui a ensuite été utilisé par Idso and De Wit (1970) pour simuler les variations de réflectance journalière sur une culture de maïs. Goudriaan a alors étendu et amélioré le modèle Idso-de Wit grâce à une description du profil du flux radiatif à l'intérieur du couvert (Goel, 1988). Ainsi, le modèle EXTRAD (EXTinction of RADiation) a été développé pour calculer le profil du rayonnement solaire au sein d'une culture, dans le cas d'une visée verticale. Les caractéristiques du couvert végétal sont : le LAI, le coefficient de diffusion des feuilles, et la distribution d'angles d'inclinaison des feuilles. Les paramètres externes sont l'élévation solaire et le pourcentage de rayonnement diffus.

d) Le modèle de Nilson-Kuusk (1989)

Ce modèle calcule la diffusion simple et multiple du rayonnement dans le couvert et dans le sol. Les paramètres optiques sont la réflectance et la transmittance des feuilles, la réflectance du sol, l'indice de réfraction de la feuille (de son enveloppe), un indice permettant la prise en compte de la réduction de la réflexion spéculaire par la feuille. Les paramètres de structure sont le LAI et la distribution d'inclinaison des feuilles (excentricité et inclinaison d'une distribution elliptique), un paramètre sans dimension pour la prise en

compte du hot-spot. Les paramètres géométriques sont les angles d'éclairement et de visée et la part de flux direct dans le rayonnement total arrivant sur le couvert.

En en restant aux versions utilisées dans le cadre de cette étude, on souligne ici certaines différences entre les modèles. Le modèle de Baret considère seulement le rayonnement solaire direct, les 3 autres prennent en compte les parts directe et diffuse du rayonnement solaire. Seuls les modèles SAIL et Kuusk peuvent simuler des visées non verticales et tiennent compte de l'effet de hot-spot. Le modèle Kuusk simule la réflexion spéculaire du rayonnement sur les feuilles, les autres modèles font l'hypothèse que les feuilles et le sol sont des surfaces lambertiennes.

Le modèle SAIL est largement utilisé dans l'ensemble du manuscrit, aussi, les paramètres d'entrée gardés constants dans tous les tests décrits plus loin (sauf précision au fil du texte) sont résumés dans le tableau II-3.

distribution angulaire des feuilles (Bunnik, 1978)	sphérique	
	visible	PIR
coefficient hémisphérique de réflexion de la feuille	0.12	0.46
coefficient hémisphérique de transmission de la feuille	0.01	0.50
réflectance hémisphérique du sol	0.13	0.19
contribution diffuse du rayonnement incident	20%	
paramètre de hot spot	0.1	

Tableau II-3 : Valeurs des paramètres du modèle SAIL utilisés pour les simulations. Les caractéristiques relatives aux feuilles sont issues de la littérature (Bouman, 1992; Baret, 1986; Kuusk, 1991b). Les propriétés optiques du sol sont obtenues à partir des images SPOT.

Les propriétés optiques de la feuille sont choisies en fonction de la littérature (Bouman, 1992; Baret, 1986; Kuusk, 1991b). Pour le site principal (Beauce), les propriétés optiques du sol ont été obtenues à partir des images SPOT : réflectances des champs qui sont en sol nu l'hiver. Comme les mesures SPOT concernent seulement des jours de ciel clair, on suppose que la contribution diffuse du rayonnement incident est de 20%. La géométrie d'éclairement et d'observation comprend l'angle zénithal solaire, l'angle zénithal de visée, et l'azimut relatif entre le soleil et le satellite au moment de l'acquisition de l'image

satellitaire. Pour le site principal (Beauce), les angles solaires sont calculés en fonction de la latitude du lieu, de la date et de l'heure du passage du satellite pour Chartres (ville se trouvant dans le site d'étude). Des mesures de la distribution angulaire des feuilles effectuées sur des cultures de blé (Baret, 1986; Pinter *et al.*, 1985; Jackson *et al.*, 1986) montrent qu'elle dépend de la variété de la plante. L'inclinaison des feuilles évolue d'autre part avec la phénologie de la plante. Plusieurs tests ont été effectués, et la distribution foliaire la plus convenable a été choisie pour les cultures de céréales d'hiver (tableau II-4).

type de couvert	$f(\theta)$	ALA
érectophile	$2(1-\cos 2\theta)/\pi$	63.24
uniforme	$2/\pi$	45.00
sphérique	$\sin\theta$	57.30
planophile	$2(1+\cos 2\theta)/\pi$	26.76

Tableau II-4 : *Distribution angulaire des feuilles pour différents types de couvert proposés par De Wit (Bunnik, 1978).*

$f(\theta)$ = distribution angulaire des feuilles, θ = angle entre l'axe de la feuille et le plan horizontal (en degrés), et ALA = angle moyen d'inclinaison des feuilles (en degrés).

Le dernier paramètre d'entrée de SAIL est le LAI qui est modélisé quotidiennement par AFRCWHEAT2.

II-1.5. Les indices de végétation

Dans le but de réduire l'effet de facteurs externes sur les réflectances tels que le sol sous-jacent, les conditions d'illumination (Bouman, 1991a), ou les effets atmosphériques, les réflectances spectrales ont été combinées de diverses façons en indices de végétation (IV). De nombreux indices de végétation ont ainsi été construits dans le but d'interpréter les mesures de télédétection. Ils combinent les réflectances visible et proche infrarouge (PIR). Baret et Guyot (1991) ont discuté de l'influence du LAI, et de l'inclinaison des feuilles ainsi que du sol sous-jacent sur plusieurs indices de végétation. Ils ont montré qu'ils peuvent être classés en deux groupes. Dans le premier, l'IV (par exemple NDVI) est très

influencé par le sol lorsque la végétation n'est pas totalement couvrante. Dans le second groupe (par exemple SAVI), l'influence du sol sous-jacent est atténuée (par rapport à l'impact sur les réflectances).

Il sera question ici de 2 indices résultant uniquement de la combinaison des réflectances visible et PIR : le Simple Ratio (SR) (Jordan, 1969), et le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974); puis de 2 indices faisant intervenir des paramètres supplémentaires pour la prise en compte des effets du sol : le Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Huete, 1988) et le Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) (Qi *et al.*, 1994). Les formules sont décrites dans la Liste des symboles.

II-2. SENSIBILITE DES 3 COMPOSANTES

On cherche à répondre à la question suivante : Peut-on estimer l'erreur due à la méconnaissance de certains paramètres sur la simulation du signal radiométrique, et l'erreur liée aux conditions de mesure (sur les observations)?

II-2.1. Modèle de fonctionnement

Au cours de cette étude, nous utilisons un modèle de fonctionnement de culture pour prédire le profil temporel de LAI. Il est nécessaire de valider les simulations issues du modèle de fonctionnement en les comparant à des mesures au sol d'indice foliaire. Les modèles de fonctionnement prédisent le développement phénologique et la production de carbone, les principaux paramètres d'entrée sont les données météorologiques et les pratiques culturales. La difficulté est de pouvoir reproduire des profils de LAI d'allures très différentes.

Nous nous proposons de comparer le LAI prédit par le modèle AFRCWHEAT2 avec celui mesuré sur la parcelle expérimentale de Grignon (données recueillies par M.H. Jeuffroy, INRA Grignon). Les caractéristiques variétales (Soissons : $P_{sat}=18$, $V_{sat}=40$), la date de semis (17 octobre 1991) et les données météorologiques (station de Grignon, 1991/1992)

sont utilisées en entrée du modèle. La simulation de LAI est comparée aux mesures issues de la surveillance terrain (fig. II-12).

La simulation surestime l'amplitude maximale du LAI et sous-estime la durée du cycle végétatif. Aux vues de nos objectifs ('assimilation'), nous nous intéressons essentiellement au phasage temporel de la période de croissance du LAI. On note ici que la simulation prédit un LAI décalé de 2 à 5 jours vers des dates plus tardives par rapport aux LAI mesurés.

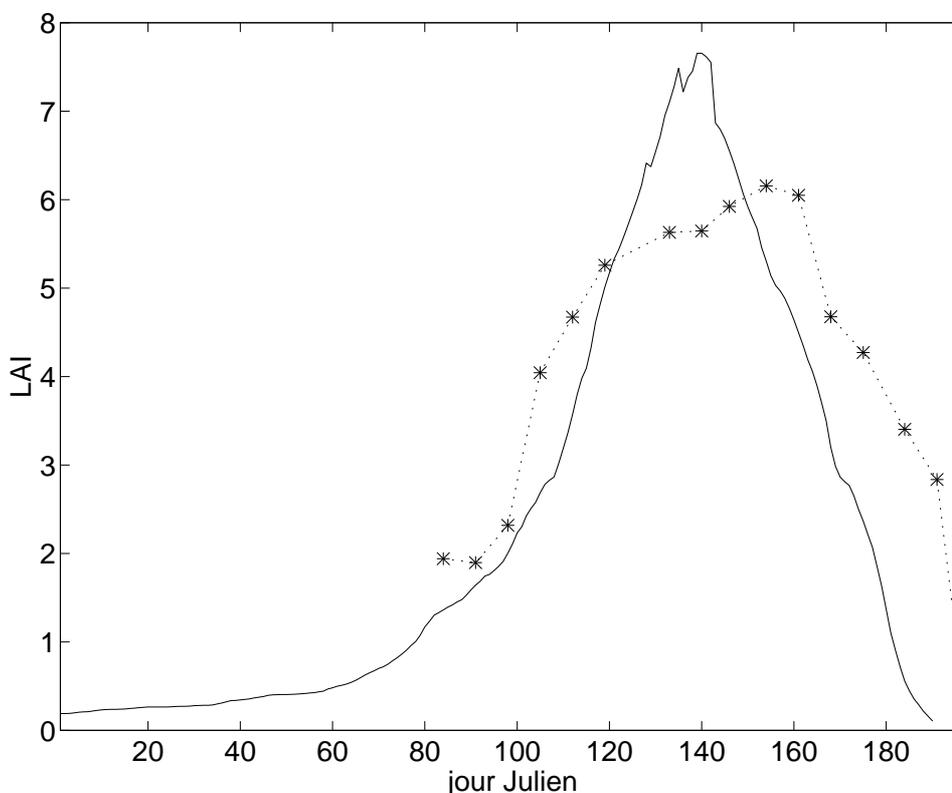


Figure II-12 : Profils temporels de LAI mesurés (*) et simulés par AFRCWHEAT2 (-). Parcelle Soissons semée le 17 octobre 1991, Grignon, 1991/1992.

Porter *et al.* (1993) ont comparé divers modèles de simulation de culture de blé d'hiver. Ils ont montré que la simulation des stades phénologiques par AFRCWHEAT2 était décalée par rapport aux observations. Le sens de la variation dépend des variétés. Kenny et Harrison (1992) ont simulé à l'aide d'AFRCWHEAT le développement phénologique d'une variété de blé d'hiver à l'échelle du continent européen. Ces simulations ont pu être validées grâce à des observations pour la Grande-Bretagne où cette variété est

communément utilisée. La durée de la période de croissance était en revanche surestimée par le modèle pour l'Italie, car cette variété nécessite une période de vernalisation plus importante que les variétés habituellement utilisées en Italie. La qualité des simulations obtenues dépend donc fortement des variétés et des conditions d'environnement auxquelles elles sont soumises.

II-2.2. Modèle de transfert radiatif dans le couvert

On cherche ici à justifier le choix du modèle de réflectance, de sa paramétrisation, et de l'indice de végétation utilisés dans l'ensemble de la Thèse. En raison de l'absence de mesures simultanées de LAI et réflectances sur le site principal (Beauce), les tests des modèles de transfert radiatif sont effectués sur un autre site (Camargue, 1987, données recueillies par M. Guérif et ses collaborateurs, INRA Laon et Avignon). Nos perspectives d'assimilation d'observations font que l'on s'intéresse tout particulièrement à la période de croissance du couvert, de ce fait on ne tient pas compte du LAI jaune apparaissant à la sénescence.

Plus un modèle est descriptif, plus nombreux sont les paramètres d'entrée. Les paramètres étant difficiles à connaître (en particulier à l'échelle régionale), nous souhaitons déterminer quel type de modèle reproduira les observations et sera le moins sensible possible à la méconnaissance de certains paramètres. On se propose de prédire les réflectances et indices de végétation obtenus grâce aux mesures terrain sur les 9 parcelles de blé d'hiver du site Camargue en 1987. On discute de la capacité des modèles de réflectance choisis à reproduire les profils temporels des signaux radiométriques observés.

Les réflectances visibles et PIR sont calculées pour les 9 parcelles avec le modèle SAIL, en utilisant en entrée des valeurs mesurées de LAI vert et de réflectances de sol, au cours de la saison végétative. Comme les mesures de LAI, de réflectances de sol et de réflectances de couvert n'ont pas toujours été effectuées aux mêmes dates, nous avons interpolé les LAI et les réflectances sol afin d'obtenir des simulations aux dates d'acquisition des réflectances de couvert. Dans le jeu de valeurs interpolées, les premières

valeurs correspondent à la première mesure effectuée. Pour certaines parcelles, la première mesure de réflectance de sol est seulement effectuée en avril. Le jeu de paramètres d'entrée du modèle SAIL donné dans le tableau II-3 a été utilisé pour prédire les réflectances pour les LAIs des 9 parcelles. Nous présentons de façon synthétique les résultats obtenus pour toutes les parcelles, ainsi que des résultats détaillés pour l'une des parcelles (P5).

a) Profils temporels de réflectances et de NDVI simulés et observés

Les profils temporels simulés avec SAIL sont comparés avec les mesures terrain.

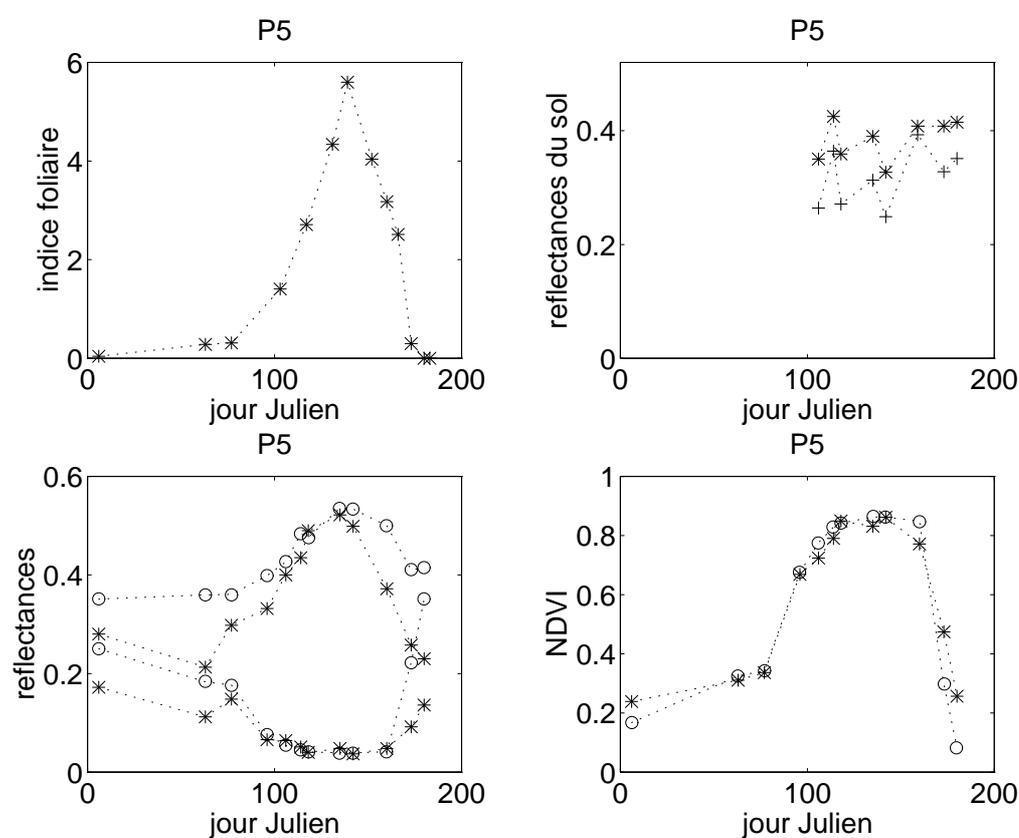


Figure II-13 : Profils saisonniers de (a) : LAI mesurés, (b) : réflectances de sol mesurées dans le canal visible (+) et le canal PIR (*), (c) : réflectances de couvert mesurées (*) et simulées (o) [courbes supérieures pour le canal PIR, courbes inférieures pour le canal visible], (d) : NDVI mesurés (*) et simulés (o). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par le modèle SAIL, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-3. P5, Site Camargue 1987.

On note que pour P5 (fig. II-13), comme pour la plupart des parcelles, les mesures de réflectances terrain sont peu nombreuses jusqu'au mois d'avril (fig. II-10).

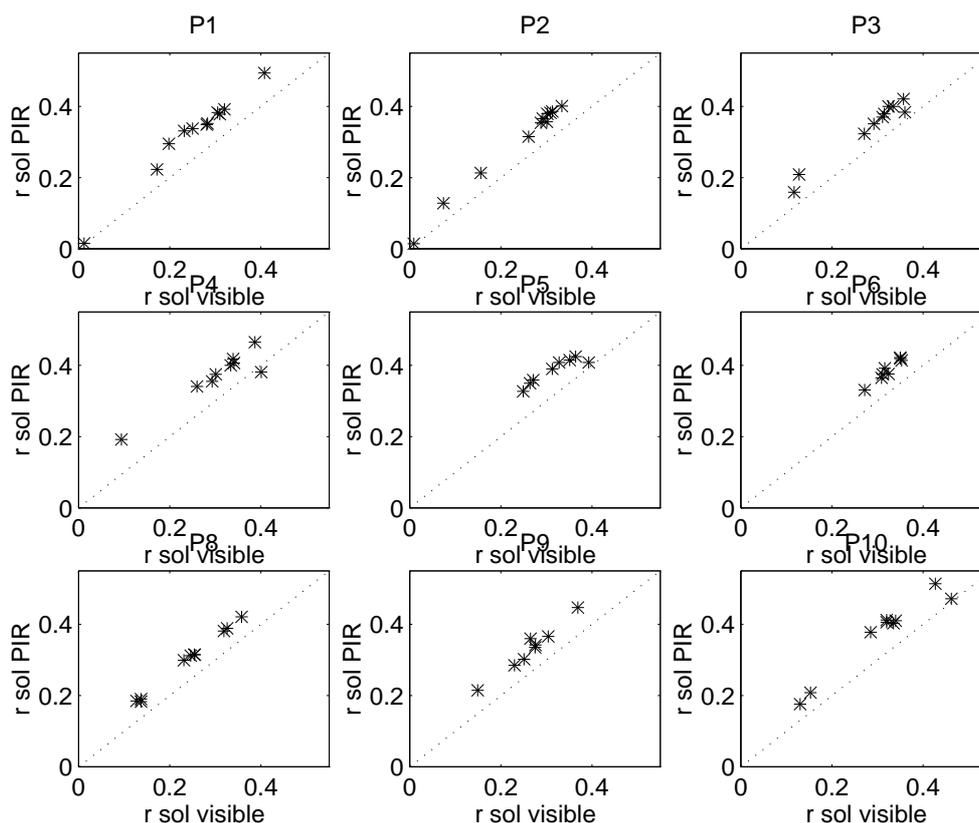


Figure II-14 : Réflectances de sol mesurées dans le PIR en fonction des réflectances de sol mesurées dans le visible pour 9 parcelles. Site Camargue, 1987.

De plus, les réflectances du sol moyennées sur la saison culturale sont élevées (par exemple pour P5, la réflectance moyenne est 0.32 dans le visible et 0.39 dans le PIR). Bien qu'il y ait une grande variabilité temporelle des réflectances de sol (essentiellement due à une variabilité de l'humidité et de la rugosité du sol) (fig. II-10), la différence entre le visible et le PIR est assez constante pour un jour donné (fig. II-14). La figure II-13c montre qu'au début de la saison de croissance, le niveau absolu des réflectances n'est pas correctement reproduit, cependant la différence entre les réflectances modélisées dans le visible et le PIR est cohérente avec la différence entre les observations. Ce phénomène conduit à un bon accord entre les profils temporels de NDVI modélisés et observés (fig. II-13d).

D'après les figures II-15 et II-16, la même conclusion est obtenue pour toutes les parcelles.

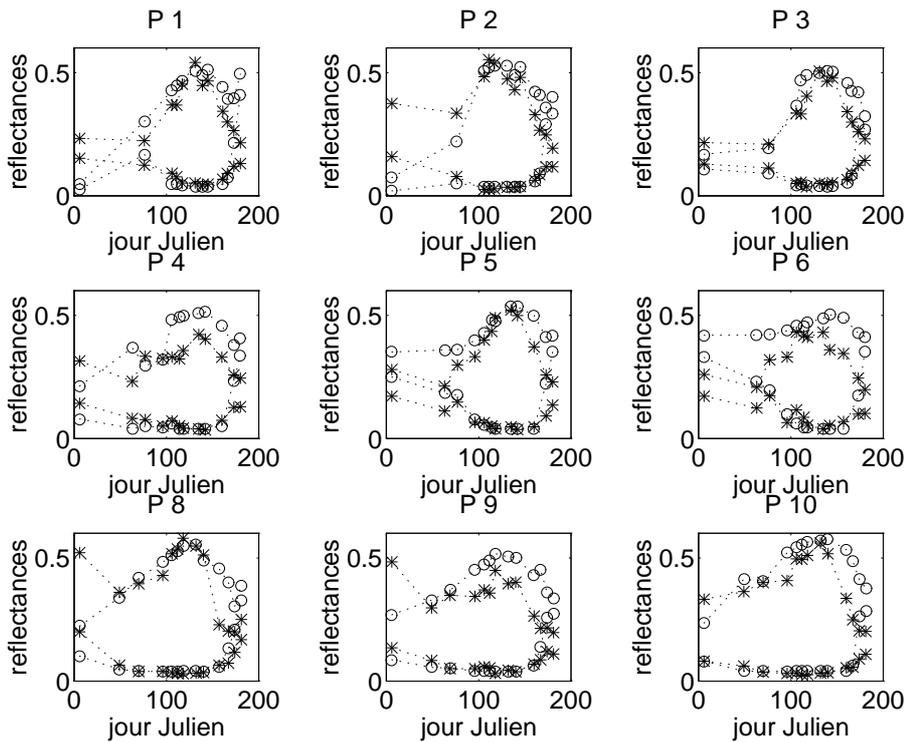


Figure II-15 : Profils saisonniers de réflectances mesurées (*) et simulées (o), courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Simulations obtenues avec le modèle SAIL, conditions de visée au nadir, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-3. Neuf parcelles (P1 à P10), site Camargue 1987.

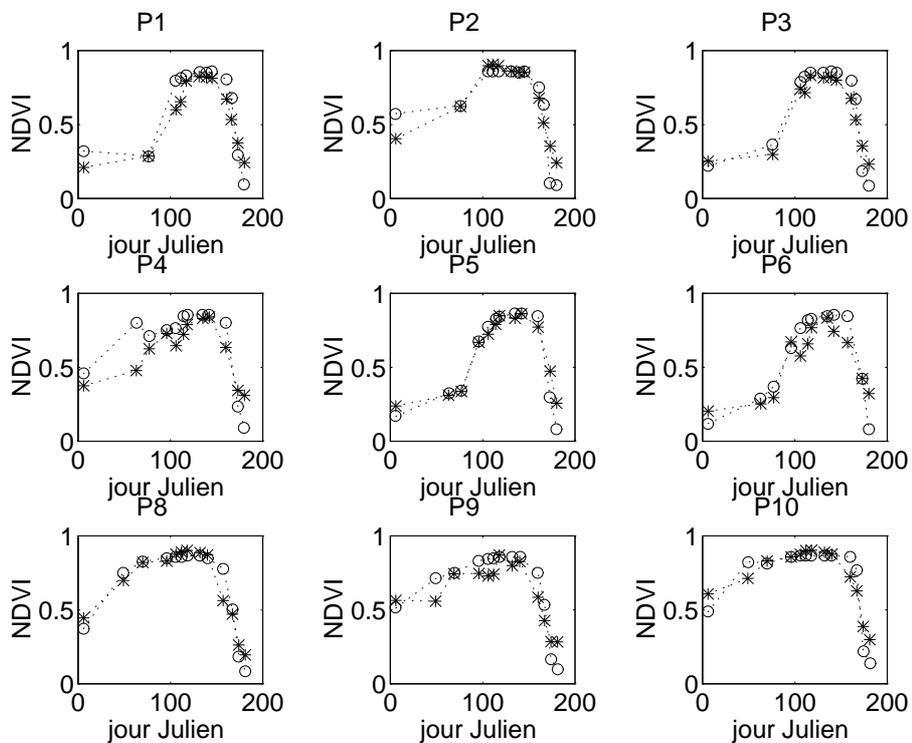


Figure II-16 : Profils saisonniers des NDVI mesurés (*) et simulés (o). Procédure identique à celle de la figure II-15. Neuf parcelles (P1 à P10), site Camargue 1987.

Les allures des courbes de NDVI en fonction du LAI obtenues avec les valeurs simulées sont similaires aux allures des mêmes courbes obtenues avec les observations (fig. II-17). On note également que les profils temporels de NDVI sont reproduits pour des cycles végétatifs ayant des allures très différentes les unes des autres (par exemple P1 et P10). Le désaccord entre modèle et observations obtenu pour P4 pour le jj (jour Julien) 63 peut être expliqué par la valeur anormalement élevée de LAI (1.7) ce jour là alors qu'il est seulement de 0.9 14 jours plus tard (fig. II-9).

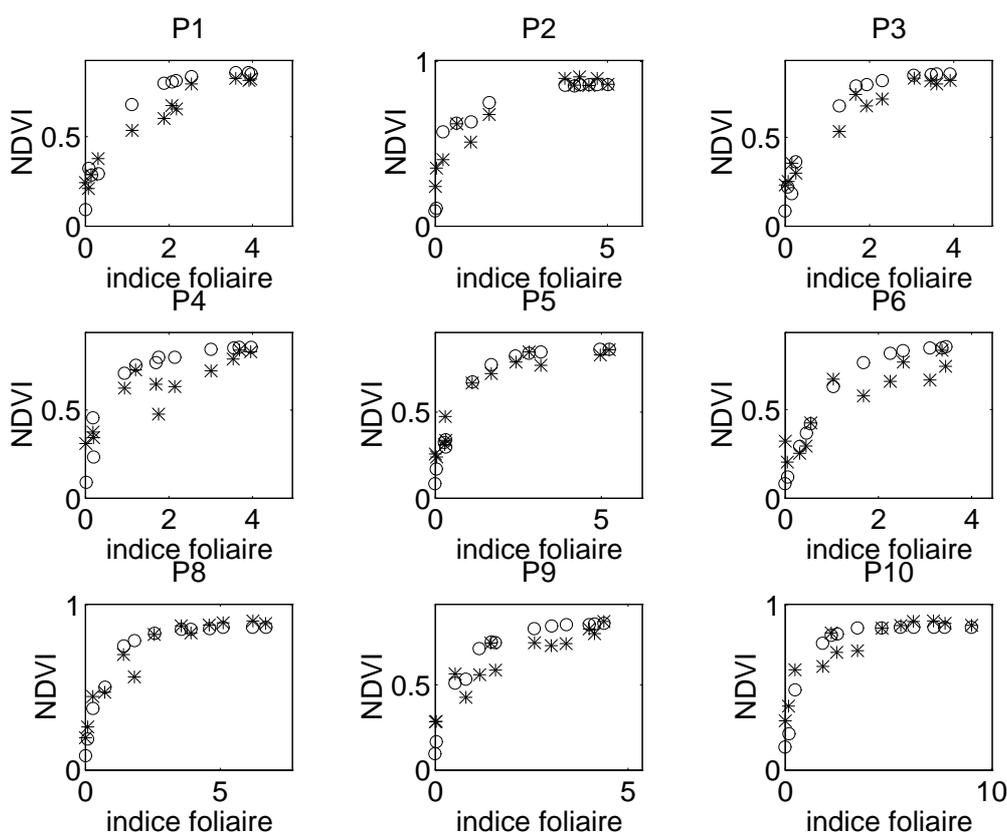


Figure II-17 : NDVI en fonction du LAI avec des valeurs mesurées (*) et des valeurs simulées (o). Neuf parcelles (P1 à P10), site Camargue 1987.

b) Sensibilité des réflectances et du NDVI aux paramètres perturbateurs

Une étude de sensibilité est effectuée concernant l'impact des paramètres d'entrée du modèle de réflectance sur les valeurs simulées.

tests de sensibilité

On teste successivement l'impact des propriétés optiques des feuilles, des réflectances de sol, et de la distribution angulaire des feuilles (tableau II-4) sur la simulation des réflectances (fig. II-18) et du NDVI (fig. II-19) en utilisant les paramètres mentionnés dans le tableau II-5.

		1ière variation	valeurs de référence	2nde variation
1ier jeu de paramètres	réflectance de la feuille	vis:0.12 pir:0.51	vis:0.12 pir:0.46	vis:0.12 pir:0.41
	transmittance de la feuille	vis:0.02 pir:0.45	vis:0.01 pir:0.50	vis:0. pir:0.55
2ième jeu de paramètres	réflectance du sol	vis:0.10 pir:0.13	vis:0.13 pir:0.19	vis:0.19 pir:0.31
3ième jeu de paramètres	distribution angulaire des feuilles (ALA)	planophile 26.76°	sphérique 57.30°	érectophile 63.24°

Tableau II-5 : Valeurs des paramètres du modèle SAIL utilisés pour les simulations. Les paramètres sont seulement indiqués lorsqu'ils diffèrent de la configuration de référence.

Les variations des paramètres à partir d'une configuration de référence ont été choisies d'après les variations utilisées par Dulk (1989) qui a effectué une étude exhaustive du transfert radiatif au travers d'une couche de couvert.

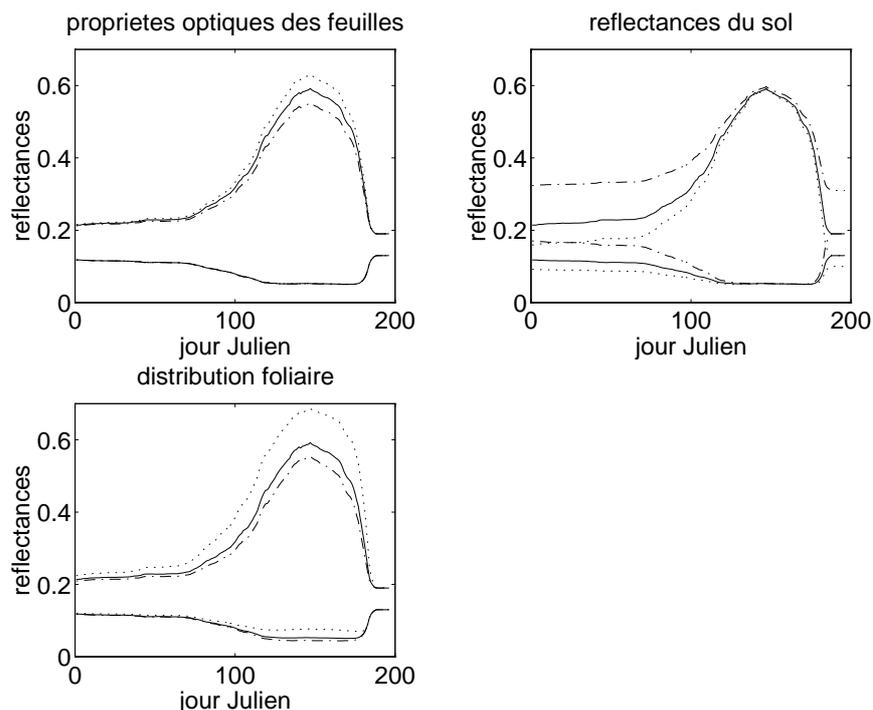


Figure II-18 : Profils saisonniers de réflectances modélisées, en 1991 (-) et 1992 (..), courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Caractéristiques de la parcelle décrites dans le tableau II-2, PB/1992. Paramètres d'entrée du modèle SAIL présentés dans le tableau II-5. Les figures a, b, c correspondent respectivement au 1er, 2ième, 3ième jeu de paramètres. (-), (..), (-.) correspondent respectivement aux valeurs de référence, à la 1ère variation, à la 2nde variation. Simulations obtenues grâce aux modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

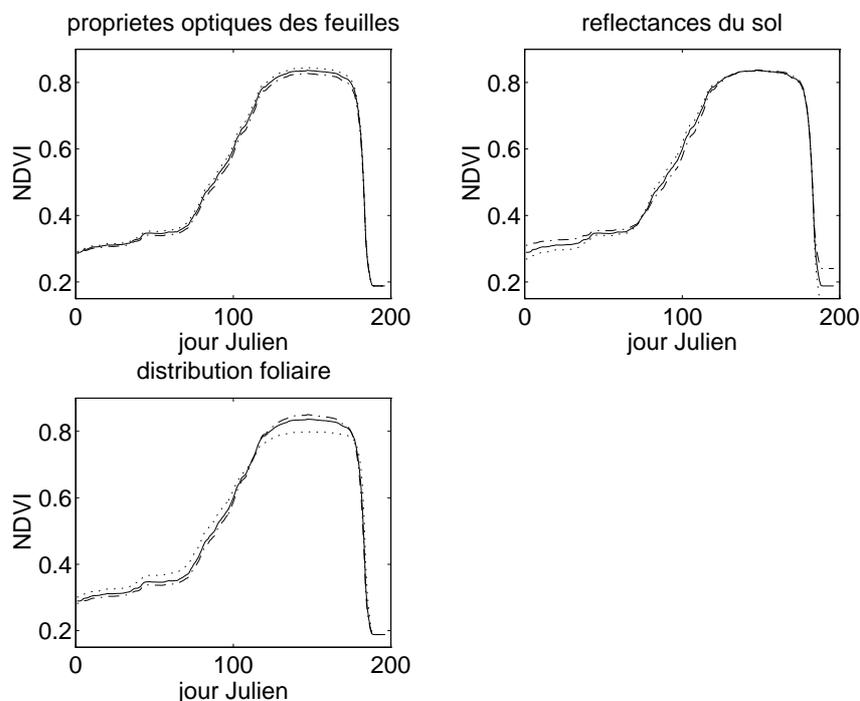


Figure II-19 : Profils saisonniers de NDVI modélisés, en 1991 (-) et 1992 (..), en utilisant la même procédure que pour la figure II-18.

Les propriétés optiques des feuilles ont une influence importante sur les réflectances lorsque le couvert est complètement développé (en mai) (figs. II-18a et II-19a), tandis que la distribution angulaire des feuilles a un impact important pendant toute la période végétative (figs. II-18c et II-19c). Pour un LAI donné, les réflectances augmentent aussi bien dans le visible et dans le PIR lorsque la distribution angulaire des feuilles devient planophile (Dulk, 1989). Plus la proportion de feuilles horizontales est grande, plus l'interception du flux incident est grande, ainsi, le processus de réflexion est concentré dans les couches supérieures du couvert. Dans le cas d'une distribution planophile, une grande proportion du rayonnement réfléchi s'échappe vers l'extérieur du couvert au lieu d'être réfléchi par le dessous des feuilles des couches se trouvant au dessus de la couche de réflexion. Dues à des valeurs de ALA (average leaf inclination angle) proches, les distributions sphériques (ALA=57.30°) et érectophile (ALA=63.24°) conduisent à des profils temporels proches, contrairement à la distribution planophile (ALA=26.76). Pendant la période de croissance ($0.2 < NDVI < 0.8$), il y a un décalage des profils temporels de NDVI des distributions sphérique et érectophile avec la distribution planophile (fig. II-19). Sur le plateau ($NDVI > 0.8$), il y a une différence d'amplitude entre les distributions sphérique et érectophile et la distribution planophile (qui est moins réaliste pour un couvert de blé). Les différences entre les simulations effectuées avec les 3 distributions foliaires sont de moins en moins importantes quand le LAI diminue, car la couverture de la végétation sur le sol diminue. Le sol sous-jacent a un impact important pendant la période de croissance, son influence diminue lorsque le LAI augmente (fig. II-18b et II-19b). Parmi ces trois paramètres, on note qu'une variation de la distribution angulaire des feuilles ou une variation des réflectances de sol engendre une grande variation des réflectances du couvert, tandis que les variations sur l'IV sont faibles.

comparaison avec l'observation

Les résultats de ces mêmes tests ont été comparés aux observations radiométriques (cas P5) pour les paramètres les plus difficiles à connaître.

Pour le test de sensibilité à la distribution foliaire, on note que parmi les 3 distributions utilisées, la distribution sphérique permet le meilleur ajustement aux observations

(rmse=0.081) (fig. II-20). Selon Ross (1981), une distribution sphérique a été mesurée par Nichiporovich (1961) pour le blé.

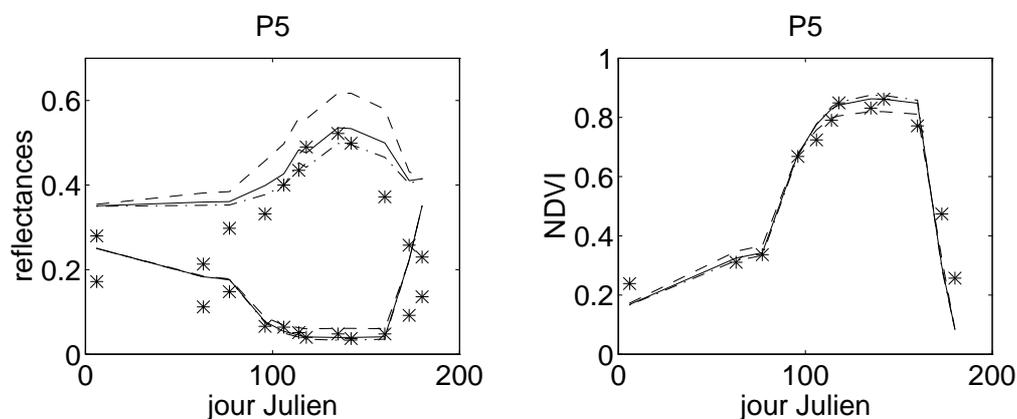


Figure II-20 : Profils saisonniers (a) : de réflectances mesurées (*) et simulées (-, --, -.), [courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible], et (b) : de NDVI mesurés (*) et simulés (-, --, -.). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par le modèle SAIL, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-3. Les distributions foliaires utilisées sont présentées dans le tableau II-4 : sphérique (-), érectophile (-.) et planophile (--). P5, site Camargue 1987.

Pour le test de sensibilité aux propriétés optiques du sol, on compare les profils temporels de réflectances et d'IV obtenus soit avec l'évolution temporelle des réflectances de sol mesurées, soit avec une valeur constante de réflectance de sol pendant la saison culturale (fig. II-21).

Dans le second cas, les valeurs des réflectances de sol ont été obtenues en moyennant les mesures de réflectance effectuées sur l'ensemble de la période végétative. Pour P5, on obtient 0.317 dans le visible et 0.385 dans le PIR. Une variation significative des réflectances du couvert a été obtenue au début du développement de la culture, lorsqu'une part importante de la surface est constituée de sol nu (fig. II-21a). L'impact d'une erreur de l'estimation des réflectances du sol est atténué sur le profil temporel de NDVI sans toutefois être complètement éliminé (fig. II-21b).

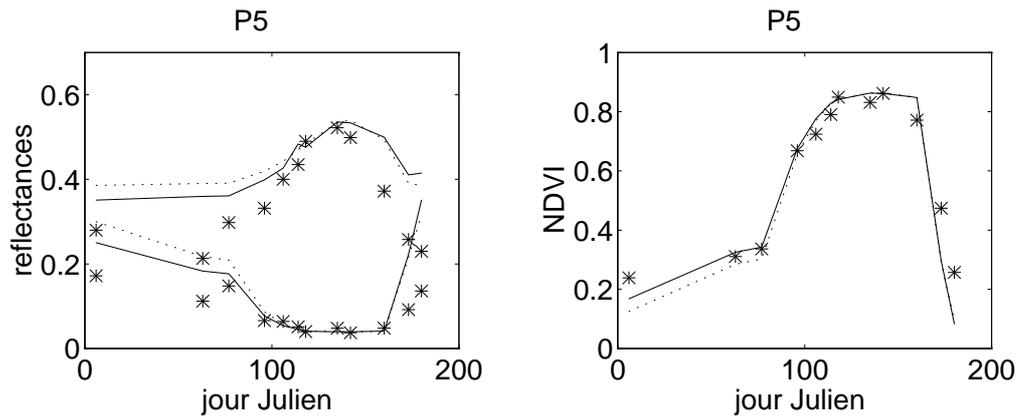


Figure II-21 : Profils saisonniers (a) : de réflectances mesurées (*) et simulées (-, ..) [courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible], et (b) : de NDVI mesurés (*) et simulés (-, ..). Pour les réflectances de sol, on utilise soit des évolutions temporelles (-), soit des valeurs moyennées sur la saison (..). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par SAIL, entrées : mesures de LAI, et paramètres résumés dans le tableau II-3. P5, site Camargue 1987.

Concernant la problématique d'"assimilation" d'observations, nous montrerons par la suite que l'impact d'une variation de condition initiale sur le profil du signal radiométrique simulé est particulièrement marqué pendant la phase de croissance du signal. Il est ainsi important de noter que l'erreur due à l'hypothèse d'une réflectance de sol constante au cours du temps n'engendre pas de décalage significatif au niveau du phasage de la "montée" du signal de NDVI.

d) Choix du modèle de réflectance et de l'indice de végétation utilisés

Les tests sont effectués avec les 4 modèles de réflectance précédemment décrits (SAIL, Baret, EXTRAD, et Nilson-Kuusk).

On trace sur un même graphe les NDVI modélisés en fonction des NDVI observés pour les neuf parcelles (fig. II-22). Dans tous les cas, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.90, en revanche la précision est assez faible : l'erreur quadratique moyenne est supérieure à 0.1 (tableau II-7).

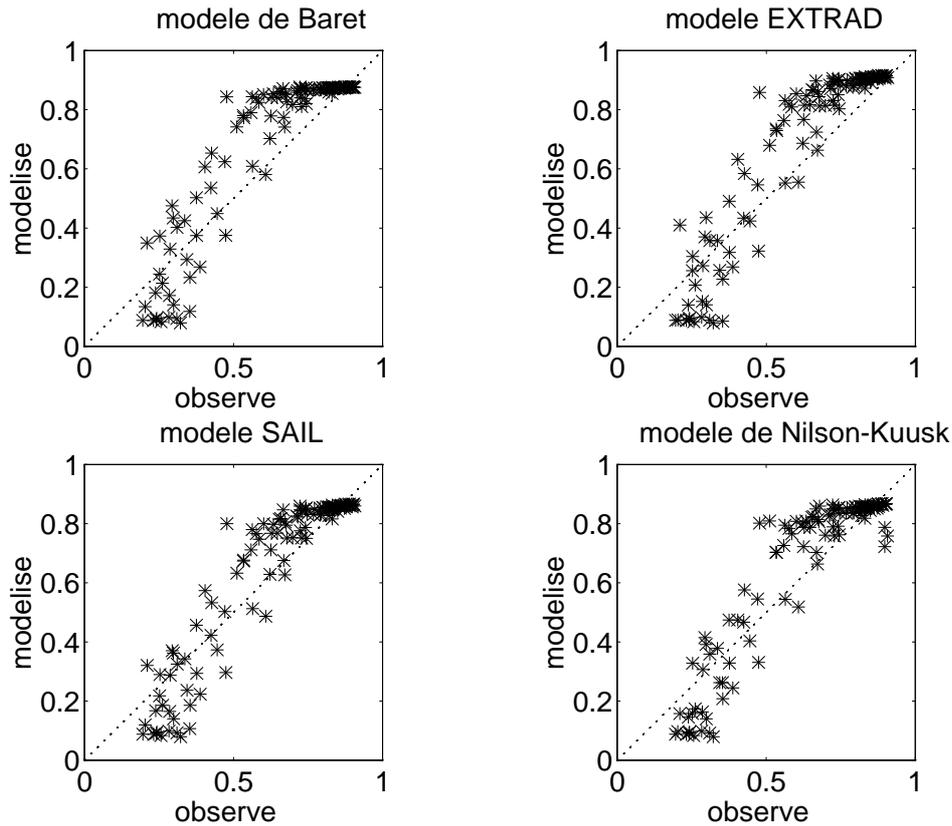


Figure II-22 : NDVI modélisés en fonction de NDVI observés pour 9 parcelles (P1 à P10). Résultats obtenus avec le modèle (a) : de Baret, (b) : EXTRAD, (c) : SAIL, (d) : de Nilson-Kuusk. Simulations dans des conditions de visée au nadir issues d'un modèle de réflectance, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-6. Interprétation des résultats dans le tableau II-7. Site Camargue 1987.

		A	B	C	D
distribution angulaire des feuilles (Bunnik, 1978)	sphérique	*	*	*	*
	visible				
	PIR				
coefficient hémisphérique de réflexion de la feuille:	0.12 0.46	*		*	*
coefficient hémisphérique de transmission de la feuille:	0.01 0.50	*		*	*
coefficient hémisphérique de diffusion de la feuille:	0.13 0.96		*		
contribution diffuse du rayonnement incident:	20%		*	*	*
paramètre de hot-spot:	0.1			*	*
indice 'leaf hair':	0.1				*
indice de réfraction de la feuille:	1.3				*

Tableau II-6 : Valeurs des paramètres des modèles de réflectance utilisés pour les simulations. Les colonnes A, B, C, D correspondent respectivement aux modèles (Baret, 1988), EXTRAD (Goudriaan, 1977), SAIL (Verhoef, 1984), et Nilson-Kuusk (1989).

	modèle de réflectance			
	Baret (1988)	EXTRAD (Goudriaan, 1977)	SAIL (Verhoef, 1984)	Nilson-Kuusk (1989)
coefficient de corrélation (r)	0.905	0.926	0.932	0.918
erreur quadratique moyenne (rmse)	0.132	0.133	0.106	0.114

Tableau II-7 : Comparaison des NDVI simulés et observés pour 9 parcelles, en utilisant successivement 4 modèles de réflectance. Simulations effectuées au nadir, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-5. Camargue 1987.

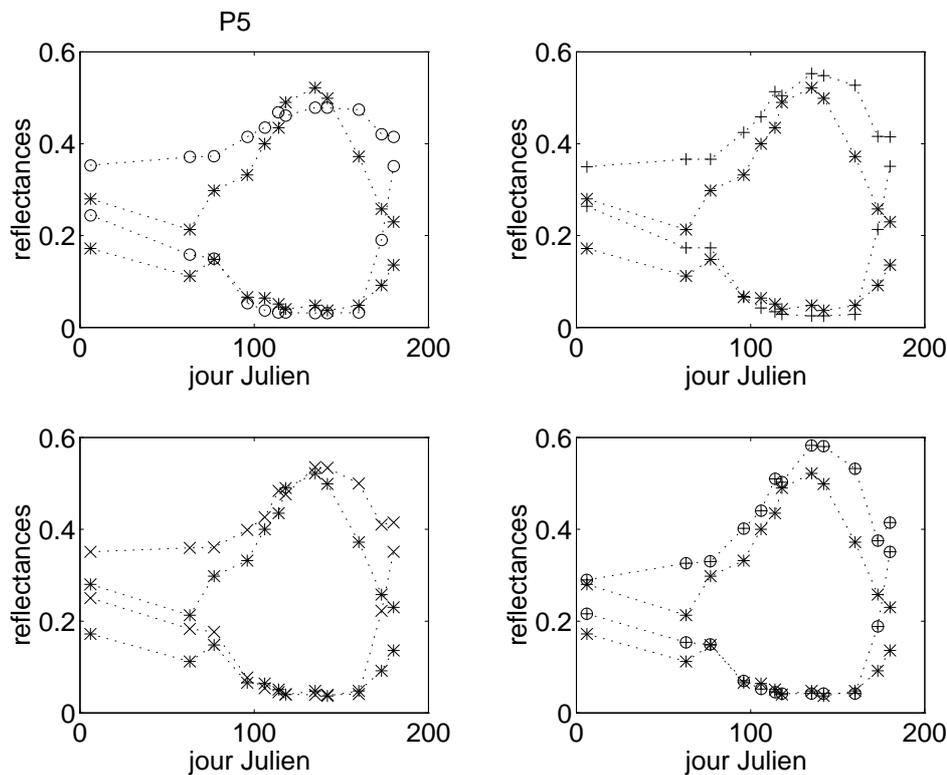


Figure II-23 : Profils saisonniers de réflectances mesurées (*) et simulées (o, +, x, o+), courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Résultats obtenus avec le modèle (a) : de Baret (1988), (b) : EXTRAD (Goudriaan, 1977), (c) : SAIL (Verhoef, 1984), (d) : de Nilson-Kuusk (1989). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par un modèle de réflectance, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-6. P5, site Camargue 1987.

Avec le jeu de paramètres utilisé (sans ajustement), la corrélation est sensiblement meilleure (coefficient de corrélation le plus élevé et rmse la plus faible) pour le modèle SAIL.

On compare ensuite les profils temporels de réflectance (fig. II-23) et de NDVI (fig. II-24) obtenus avec les 4 modèles, dans le cas de P5.

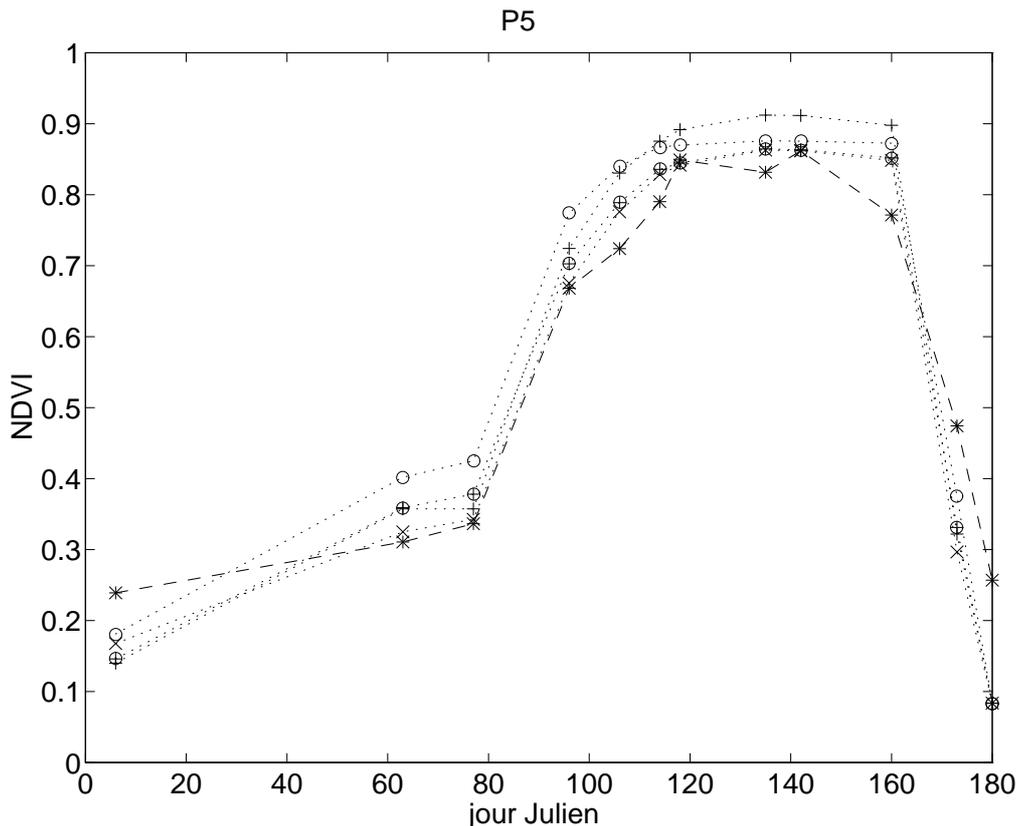


Figure II-24 : Profils saisonniers de NDVI mesurés (*) et simulés (o, +, x, o+) avec le modèle de Baret (1988) (o), EXTRAD (Goudriaan, 1977) (+), SAIL (Verhoef, 1984) (x), et le modèle de Nilson-Kuusk (1989) (o+). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par un modèle de réflectance, entrées : mesures de LAI et de réflectance de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-6. P5, site Camargue 1987.

SAIL et EXTRAD ont des comportements très proches pendant l'ensemble de la période végétative (figs. II-23b et c). Pendant la phase de croissance, Baret, EXTRAD et SAIL donnent des résultats proches, tandis que Nilson-Kuusk conduit à des réflectances PIR plus faibles. Après la phase de croissance, dans le PIR, EXTRAD et SAIL conduisent à des réflectances équivalentes, alors que celles données par Baret sont plus faibles et celles données par Nilson-Kuusk plus élevées. On note que les profils temporels de NDVI

obtenus avec les 4 modèles (fig. II-24) sont proches les uns des autres (la plus grande différence obtenue est 0.1 le jj 96) et cohérents avec les observations. La phase de montée est cependant décalée de quelques jours. Si l'on trace les réflectances modélisées en fonction des réflectances observées (toutes parcelles confondues), les coefficients de corrélation (r) sont très faibles ($r=0.70$ dans le visible et $r=0.54$ dans le PIR). Le même exercice effectué avec le NDVI donne un coefficient de corrélation largement supérieur ($r=0.93$). On compare alors les résultats obtenus avec les 4 indices de végétation précédemment décrits (SR, NDVI, SAVI, et MSAVI) (fig. II-25 et tableau II-8). Les paramètres des SAVI et MSAVI correspondent à des conditions de sol standard.

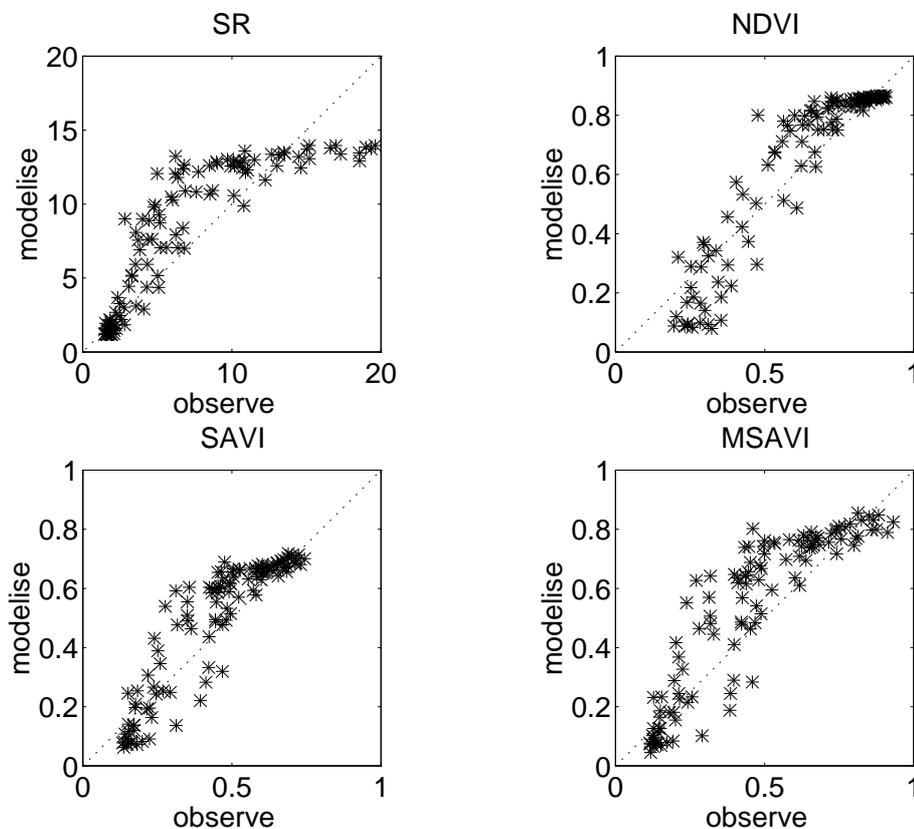


Figure II-25 : Indices de végétation modélisés en fonction d'indices observés. (a): SR (Jordan, 1969), (b) : NDVI (Rouse et al., 1974), (c) : SAVI (Huete, 1988) et (d) : MSAVI (Qi et al., 1994). Simulations dans des conditions de visée au nadir données par SAIL, entrées : mesures de LAI, et paramètres résumés dans le tableau II-3. Neuf parcelles (P1 à P10), Camargue 1987.

	NDVI (Rouse <i>et al.</i> , 1974)	SR (Jordan, 1969)	SAVI (Huete, 1988)	MSAVI (Qi <i>et al.</i> , 1994)
coefficient de corrélation (r)	0.93	0.85	0.91	0.89
erreur quadratique moyenne (rmse)	0.106	2.920	0.103	0.139
erreur relative	18%	37%	24%	31%

Tableau II-8 : Comparaison des indices de végétation simulés et observés pour 9 parcelles en utilisant 4 différents indices de végétation. Simulations effectuées avec le modèle SAIL, entrées : mesures de LAI et de réflectances de sol, et paramètres résumés dans le tableau II-3. Il y a 111 valeurs mesurées et simulées, toutes parcelles confondues. Site Camargue 1987.

Le meilleur coefficient de corrélation et la plus faible erreur relative sont obtenus pour le NDVI qui est l'indice le plus largement utilisé. De plus, l'utilisation des SAVI et MSAVI suppose que l'on ait une information concernant le sol afin d'ajuster les paramètres de sol dont ces indices dépendent. Le NDVI conduit à une bonne corrélation modèle/observation, reproduit correctement les profils temporels observés (fig. II-16) et permet de minimiser les effets perturbateurs sur les réflectances, ceci sans ajustement des paramètres perturbateurs.

Il ne s'agissait pas ici d'effectuer une étude exhaustive concernant les modèles de réflectances et les indices de végétation par ailleurs abordés par de nombreux auteurs, mais bien de justifier le choix du modèle SAIL (et de sa paramétrisation) et de l'indice de végétation NDVI qui seront utilisés dans la suite du manuscrit. Si l'on utilise des réflectances, la principale source d'erreur est la méconnaissance du profil temporel des réflectances de sol. L'utilisation du NDVI atténue les effets des paramètres perturbateurs tels que la distribution angulaire des feuilles, la réflectance du sol et les propriétés optiques des feuilles. La précision obtenue est cependant faible (rmse=0.1, erreur relative=18%), malgré un coefficient de corrélation satisfaisant (r=0.93).

II-2.3. Modèle de corrections atmosphériques

Les observations acquises par le capteur SPOT HRV sont largement utilisées dans le manuscrit, aussi nous testons la sensibilité du modèle de corrections atmosphériques utilisé pour ces données-là.

a) Données brutes et corrigées

Les corrections atmosphériques ont été effectuées avec les conditions décrites lors de la présentation des données spatiales haute résolution. De façon générale, la correction des effets atmosphériques diminue les réflectances dans le visible (réflectances à la surface du couvert plus faibles qu'au sommet de l'atmosphère) et augmente les réflectances dans le PIR ainsi que les NDVI. A titre d'exemple, les données brutes et corrigées des effets atmosphériques pour les principaux groupes de la classification sont présentées dans le tableau II-9 pour deux dates d'acquisition en 1992.

date d'acquisition (1992)	classe de végétation	réflectance visible		réflectance PIR		NDVI	
		TOA	surface	TOA	surface	TOA	surface
09 avril	blé d'hiver	0.10	0.09	0.32	0.35	0.53	0.61
	pois	0.14	0.13	0.30	0.32	0.37	0.41
18 mai	blé d'hiver	0.08	0.07	0.45	0.49	0.69	0.77
	pois	0.12	0.10	0.41	0.45	0.56	0.63

Tableau II-9 : *Réflectances et NDVI SPOT HRV au sommet de l'atmosphère (TOA) et à la surface de couvert pour deux classes de végétation et deux dates d'acquisition. Chaque valeur de réflectance est la moyenne des réflectances de tous les pixels de la classe. Pour les deux dates d'acquisition, les caractéristiques atmosphériques utilisées pour les corrections sont : contenu en vapeur d'eau, 1.4g.cm⁻², 1.8g.cm⁻²; contenu en ozone, 0.37 atm.cm, 0.35 atm.cm; épaisseur optique des aérosols à 550nm, 0.2347, 0.2347.*

b) Sensibilité du modèle de corrections atmosphériques

L'erreur engendrée par la correction des effets atmosphériques peut être due (i) à une mauvaise modélisation des processus en question ou (ii) à une incertitude concernant certaines entrées du modèle (par exemple, l'épaisseur optique des aérosols). Nous testons ici l'effet d'une erreur affectant certains paramètres d'entrée sur la réflectance estimée à la surface. Parmi tous les effets perturbateurs dus à la présence de l'atmosphère, nous nous en tenons aux effets induits par une méconnaissance de l'évolution temporelle du contenu en vapeur d'eau et en aérosols de l'atmosphère (tableau II-10). Les paramètres de référence utilisés dans le modèle atmosphérique sont : contenu vapeur d'eau : $UH_2O=1.8\text{g/cm}^2$, contenu en ozone : $UOZ=0.350\text{ cm-atm}$ et épaisseur optique des aérosols à 550 nm : $T=0.2347$.

Une variation de ± 0.15 de l'épaisseur optique conduit à une erreur relative de $\pm 3\%$ dans le PIR et de $\pm 10\%$ de la réflectance visible (c'est à dire 0.07 ± 0.007 pour le blé). Une variation de $\pm 1.5\text{ g.cm}^{-2}$ du contenu en vapeur d'eau (eau précipitable d'une colonne d'atmosphère) conduit à une erreur relative de $\pm 3.7\%$ dans la réflectance PIR (c'est à dire, 0.49 ± 0.02 pour le blé) et de $\pm 1.5\%$ dans le visible. Seule une incertitude très importante sur le contenu en vapeur d'eau et en aérosol engendre une erreur significative sur l'estimation des réflectances de surface PIR. L'erreur la plus grande est engendrée par une variation de ± 0.15 de l'épaisseur optique sur la réflectance de surface visible (10%). Si l'on combine les incertitudes dues aux 2 phénomènes, en considérant des variations maximales (64% sur T et 83% sur UH_2O), on obtient une erreur de 7% dans le PIR et de 12% dans le visible.

canal PIR, variation de l'épaisseur optique T			
variation	aérosol	Rsurface	erreur relative
T _o -0.15	0.0847	0.478	-3%
T _o -0.1	0.1347	0.483	-2%
T _o	0.2347	0.493	
T _o +0.1	0.3347	0.503	+2%
T _o +0.15	0.3847	0.508	+3%
canal PIR, variation du contenu en vapeur d'eau UH ₂ O			
variation	vapeur d'eau	Rsurface	erreur relative
UH ₂ O _o -1.5	0.3	0.475	-3.7%
UH ₂ O _o -1.	0.8	0.482	-2.2%
UH ₂ O _o	1.8	0.493	
UH ₂ O _o +1.	2.8	0.501	+1.6%
UH ₂ O _o +1.5	3.3	0.511	+3.7%
canal visible, variation de l'épaisseur optique T			
variation	aérosol	Rsurface	erreur relative
T _o -0.15	0.0847	0.071	+9.2%
T _o -0.1	0.1347	0.069	+6.2%
T _o	0.2347	0.065	
T _o +0.1	0.3347	0.060	-7.7%
T _o +0.15	0.3847	0.058	-10.8%
canal visible, variation du contenu en vapeur d'eau UH ₂ O			
variation	vapeur d'eau	Rsurface	erreur relative
UH ₂ O _o -1.5	0.3	0.064	1.5%
UH ₂ O _o -1.	0.8	0.064	1.5%
UH ₂ O _o	1.8	0.065	
UH ₂ O _o +1.	2.8	0.066	1.5%
UH ₂ O _o +1.5	3.3	0.066	1.5%

Tableau II-10 : Sensibilité des réflectances aux entrées du modèle de correction atmosphérique. Cas de la scène SPOT 18 mai 1992 (voir tableau II-1 pour la configuration géométrique), pour l'ensemble des parcelles de blé d'hiver de la région. La réflectance TOA est 0.449 dans le PIR et 0.084 dans le visible. En utilisant les paramètres de référence, la réflectance de surface est 0.493 dans le PIR et 0.065 dans le visible.

II-3. CONCLUSION

modèle de fonctionnement

Sur une parcelle expérimentale de blé, on a comparé le profil temporel du LAI mesuré et du LAI simulé par AFRCWHEAT2. Il est difficile de conclure à partir de résultats obtenus sur une seule parcelle. Toutefois, pendant la phase de croissance du LAI, on note que les LAIs prédits par le modèle sont décalés (retard) temporellement de quelques jours (au maximum 7), c'est à dire que pour un jour donné, la valeur simulée est plus faible que la valeur mesurée.

modèle de réflectance

On a reproduit les profils temporels de mesures radiométriques terrain (réflectances et indice de végétation) de 9 parcelles de blé d'hiver sur le site Camargue 1987 en utilisant un modèle de réflectance. Les résultats obtenus en terme de réflectances simulées sont très sensibles aux variations de paramètres comme la distribution angulaire des feuilles et les réflectances du sol. Dans la perspective d'utilisation de données satellitaires après celle de données terrain, on a simulé le signal radiométrique en utilisant une réflectance sol fixe au cours du temps, ceci nous a permis de voir que l'erreur induite sur les réflectances est partiellement atténuée sur le NDVI. L'évolution de la structure de la végétation au cours du temps (en terme de distribution angulaire des feuilles) n'est pas décrite, toutefois on fait l'hypothèse qu'une distribution sphérique peut rendre compte des effets combinés de divers paramètres (distribution angulaire, couverture fractionnaire, agrégation). La comparaison effectuée entre 4 modèles de réflectance et 4 indices de végétation permet de confirmer que l'utilisation du modèle SAIL et du NDVI est un bon compromis entre la complexité et le nombre de paramètres d'entrée des modèles. Les résultats obtenus avec le NDVI sont satisfaisants malgré la grande variabilité temporelle des réflectances de sol qui perturbe la prédiction des réflectances. Sans ajuster aucun des paramètres perturbateurs (propriétés optiques des feuilles et du sol, distribution foliaire), on obtient sur l'ensemble des parcelles (soit 111 points) un coefficient de corrélation de 0.93, une erreur quadratique moyenne de 0.1 et une erreur relative de 18% avec le NDVI.

modèle de corrections atmosphériques

Parmi les diverses sources d'erreur dues à l'utilisation d'un modèle de corrections atmosphériques, nous avons testé l'impact d'une incertitude sur les paramètres d'entrée pour lesquels on ne dispose pas de suivi temporel et ayant une grande influence sur l'estimation des réflectances de surface. Une erreur liée à la méconnaissance de l'évolution temporelle du contenu en vapeur d'eau et en aérosol de l'atmosphère conduit, si l'erreur sur ces paramètres est supérieure à 50%, à une erreur de 7% dans le PIR et de 12% dans le visible.

Au cours du Chapitre suivant, chacun des outils (données et modèles) précédemment décrits sera utilisé dans le but de simuler la mesure radiométrique acquise par satellite. En effet, la donnée satellitaire permet une spatialisation et permet également de s'affranchir d'enquêtes terrain onéreuses. Par rapport à la modélisation de mesures au sol, de nouvelles sources d'erreur apparaissent avec essentiellement les perturbations liées à la présence de l'atmosphère et aux conditions de visée.

CHAPITRE III

SIMULATION EN MODE DIRECT - HAUTE RESOLUTION SPATIALE

III-1. INTRODUCTION

Dans le cas de l'absence d'enquête terrain, et dans la perspective d'une étude à l'échelle régionale, on utilise un modèle de fonctionnement de culture pour prédire les profils temporels de LAI, à l'échelle de la parcelle agricole.

Le premier but de ce Chapitre est de vérifier si l'utilisation conjointe d'un modèle de croissance de végétation et d'un modèle de transfert radiatif peut permettre de reproduire les observations satellitaires à l'échelle de la parcelle. Il s'agira ensuite de vérifier si une variation inter-annuelle des profils temporels de variables radiométriques observées peut être reproduite à l'aide de ces mêmes modèles couplés.

Les questions soulevées au cours de ce Chapitre sont les suivantes :

Peut-on prévoir des réflectances satellitaires par le couplage d'un modèle de fonctionnement et d'un modèle de transfert radiatif dans le couvert, à haute résolution spatiale (Moulin et al., 1995)?

Peut-on prédire et observer des variations inter-annuelles de profil temporel de réflectance (ou combinaison de réflectances)?

Peut-on attribuer ces variations de réflectances à des différences objectives de paramètres/variables liés à la culture (date de semis, variété) ou au forçage (météorologie)?

Ces variations de paramètres ont-elles un impact sur la productivité?

III-2. MODELISATION DES REFLECTANCES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

III-2.1. Sensibilité des réflectances à la distribution angulaire des feuilles

Le modèle de culture AFRCWHEAT2 et le modèle de réflectance SAIL (paramètres d'entrée résumés dans le tableau II-3 sans prise en compte du hot-spot et de la part diffuse du rayonnement incident) sont utilisés pour prédire les réflectances. Les simulations effectuées montrent une grande sensibilité des réflectances à la distribution des angles foliaires (fig. II-18c). Notons toutefois que la distribution théorique planophile (tableau II-

4) est irréaliste pour le blé. Nous avons comparé les réflectances modélisées avec les valeurs observées sur les scènes SPOT afin de choisir la distribution foliaire la plus adaptée pour le blé d'hiver. La date de semis et la variété de la plante sont les paramètres les plus importants qui pilotent la croissance et le développement du blé pour des conditions environnementales données. On suppose alors que les simulations fournies par AFRCWHEAT2 sont fiables quand la date de semis et la variété sont connues.

Les données pour les 16 segments donnent la distribution des dates de semis et des différentes variétés de blé (fig. II-2) et d'orge. Ceci conduit à différentes combinaisons de date de semis et de variété (49 configurations pour les cultures de blé et 12 pour les cultures d'orge en 1991). Le modèle de croissance et le modèle de transfert radiatif sont utilisés pour simuler les réflectances correspondant aux 17 configurations de blé (variété/date de semis) les plus fréquentes dans les canaux visible et PIR. Des mesures (Baret, 1986) ont montré que l'inclinaison des feuilles de blé varie entre les distributions uniforme et érectophile. Pour 3 dates d'acquisition, les réflectances modélisées et observées ont été comparées pour trois distributions d'angle foliaire (tableau II-4), pour 100 parcelles de blé d'hiver (soit 17 configurations). Dans le visible, la faible dynamique des réflectances ne permet pas de conclure. Par contre, la figure III-1 montre les résultats obtenus dans le PIR, où la dynamique est plus grande, pour 3 des dates acquises pendant la période de croissance des céréales.

En mai, quand le couvert végétal est bien développé, la distribution sphérique conduit aux meilleurs résultats. Nous utilisons cette distribution, qui est la plus fréquemment mentionnée dans la littérature, pour l'ensemble des tests qui suivent. Cependant, on note qu'en avril, la distribution uniforme est plus satisfaisante que la sphérique. Comme nous l'avons souligné au cours du Chapitre II, il s'avère que l'inclinaison des feuilles n'est pas constante au cours de l'année et dépend fortement de la variété des céréales (Baret, 1986). En avril, la modélisation est perturbée par la grande variabilité des réflectances du sol et par le déphasage temporel généré par le modèle de fonctionnement, ces perturbations n'existent plus en mai. Aux faibles valeurs de LAI, comme le sol sous-jacent n'est pas décrit avec précision (pas de variations temporelles), l'erreur au niveau des réflectances

simulées est accrue. De plus, lorsque le LAI dépasse 6, on suppose que le couvert végétal est homogène et recouvre totalement le sol. Ceci est vrai en mai (LAI égal à 7 ou 8), mais en avril les plantes sont rassemblées en touffes le long des sillons, avec un LAI inférieur à 3, et entourées de sol nu. La couverture fractionnaire est faible, et, juste après le stade de développement correspondant au "débourrage", les réflectances de couvert données par SAIL ne sont pas représentatives de la surface. Par exemple, le 8 avril, le LAI est 1.5 et la simulation actuelle prédit les réflectances suivantes : 0.06 dans le visible et 0.33 dans le PIR. Si l'on suppose que la végétation couvre seulement 50% de la surface de sol au lieu de 100%, on obtient des réflectances résultantes de 0.09 dans le visible (soit une variation relative de 50%) et 0.35 dans le PIR (soit une variation relative de 6%). Ce dernier résultat est plus satisfaisant.

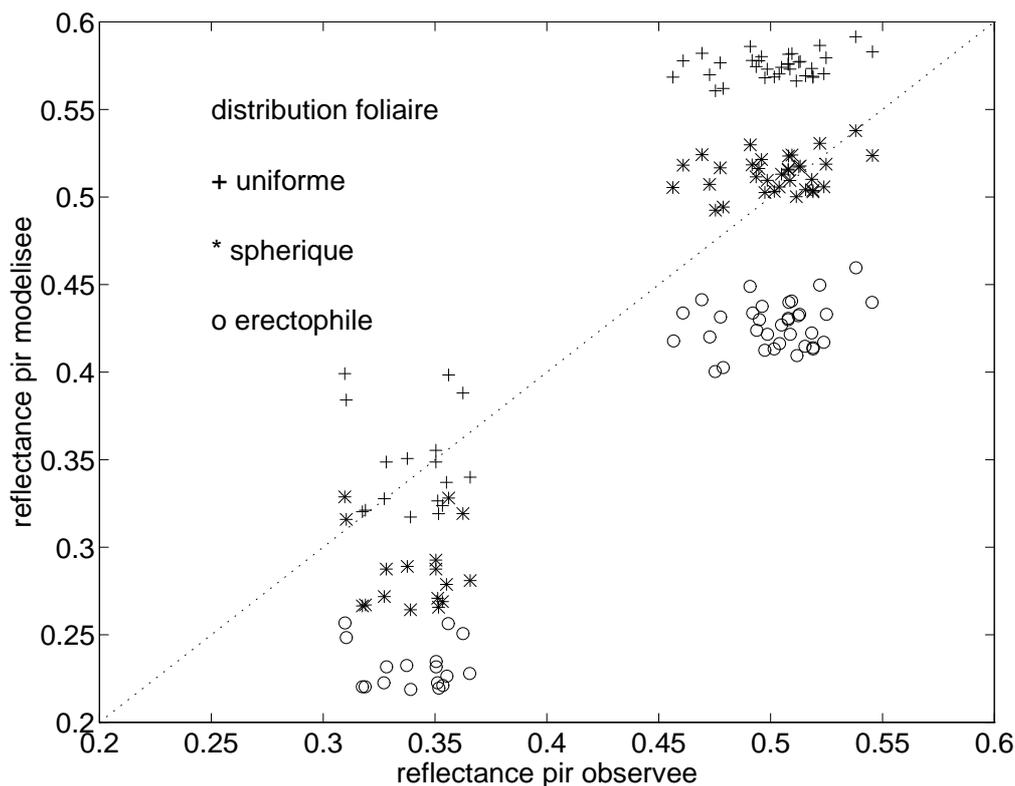


Figure III-1 : Réflectances modélisées en fonction des réflectances observées SPOT HRV pour les 17 combinaisons de date de semis/variété les plus représentées (correspondant à 100 parcelles), dans le canal PIR, pour 3 distributions angulaires des feuilles : (+) uniforme, (*) sphérique et (o) érectophile. Chaque point représente la réflectance moyenne pour une combinaison. Les valeurs les plus basses sont celles du 9 avril, les plus élevées celles des 13 et 18 mai. Simulation obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL. Les observations sont les mesures SPOT pour 3 des 5 dates d'acquisition disponibles en 1992.

Une amélioration de la méthode proposée consisterait à considérer le profil temporel de l'angle d'inclinaison des feuilles, des propriétés optiques du sol sous-jacent et de la couverture fractionnaire, et à étalonner le modèle de fonctionnement avec précision. Des résultats préliminaires (Moulin *et al.*, 1994) ont montré l'importance de la couverture fractionnaire de la végétation pour le calcul des réflectances et nous ont conduit à considérer ce facteur à l'échelle régionale.

III.2.2. Profils temporels de réflectances

Les données issues de l'enquête terrain ont montré que les dates de semis varient sur une période de 5 semaines autour du 22 octobre (jj 296) pour le blé, et sur une période de 3 semaines autour du 10 octobre (jj 284) pour l'orge, et qu'il y a 13 variétés de blé et 5 d'orge. L'enquête terrain permet de déduire le pourcentage de la surface consacrée à chaque configuration de variété/date de semis. Par exemple, la variété de blé d'hiver 'Soissons', semée le jour Julien 288 (15 octobre) représente 14% des parcelles enquêtées en 1992. Cette combinaison de variété (no. 3 sur le fig. II-2) et date de semis apparaît avec la plus grande fréquence parmi les céréales d'hiver.

On simule les réflectances correspondant à cette configuration en utilisant successivement AFRCWHEAT2 pour modéliser le LAI (fig. III-2) puis SAIL pour obtenir les réflectances dans le visible et le PIR. La figure III-3 montre les réflectances quotidiennement simulées (visée au nadir), et les valeurs aussi bien simulées qu'observées pour chaque date d'acquisition, dans les bandes du visible et du PIR. Pour les 5 dates d'acquisition SPOT, on utilise les angles d'observation et solaires au moment de l'acquisition des images satellitaires. Une moyenne des réflectances observées a été calculée pour toutes les parcelles de blé d'hiver de la variété Soissons semée le 15 Octobre.

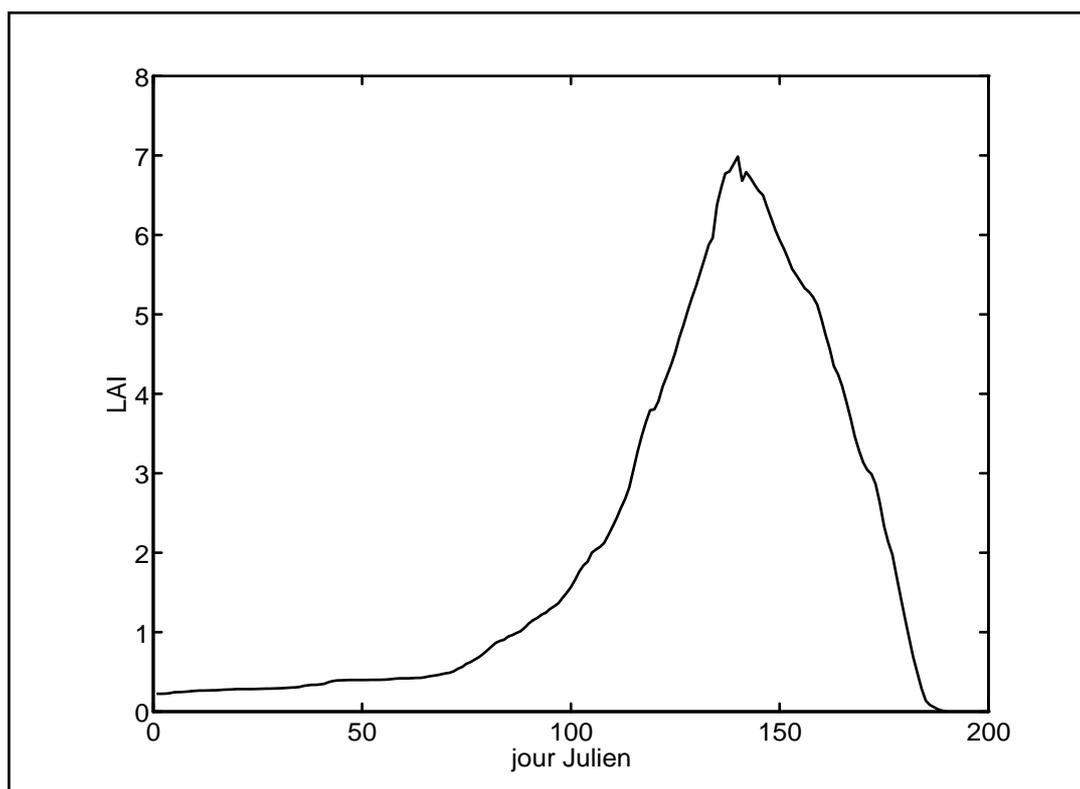


Figure III-2 : Profil temporel de LAI modélisé pour la variété de blé d'hiver "Soissons" semée le jj 288 (15 octobre 1991). Simulations effectuées avec le modèle AFRCWHEAT2.

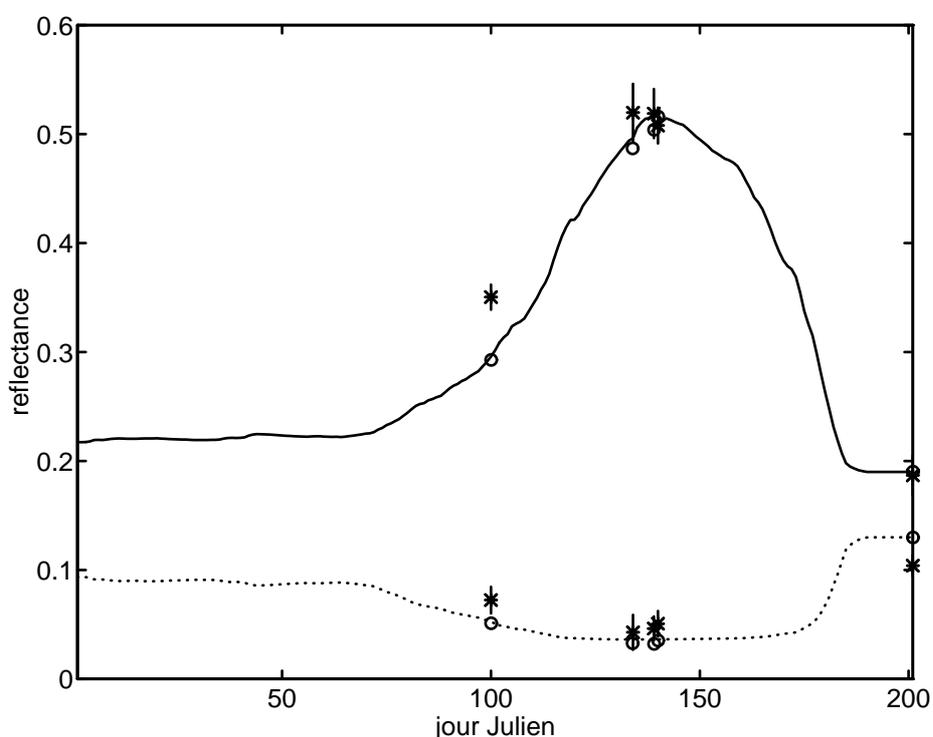


Figure III-3 : Profils saisonniers de réflectances modélisées (valeurs moyennes pour toutes les parcelles de variétés Soissons semées le 15 octobre) et réflectances SPOT pour les cinq dates d'acquisition disponibles : modélisées dans les conditions d'acquisition (o) et observées (*) +/- 1 écart-type, courbes continues : (..) canal visible et (-) canal PIR. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

III-3. VARIATIONS INTER-ANNUELLES DE REFLECTANCES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

Comme le profil temporel du signal radiométrique observé par satellite peut être reproduit pour un jeu de conditions initiales et environnementales, nous nous intéressons à l'étude des variabilités inter-annuelles en utilisant la télédétection. L'objectif est de reproduire les variations des profils temporels de réflectances d'une année sur l'autre, sur un site donné. C'est une étape préliminaire avant de pouvoir retrouver les variations de paramètres de surface pertinents à partir de variations de mesures satellitaires, le forçage climatique étant connu. L'intérêt de pouvoir retrouver de tels paramètres (par exemple la variété ou date de semis) est l'initialisation des modèles de fonctionnement dans le but de prédire la production des cultures qui n'est pas directement accessible à partir de données acquises par satellite.

Au vu de nos objectifs, les paramètres pertinents sont ceux qui ont une grande influence sur la phénologie de la plante. L'impact de ces paramètres doit être significatif sur les profils temporels du signal radiométrique. Trois groupes de paramètres ou variables affectent fortement le LAI et les profils temporels de réflectances.

- conditions d'environnement (données météorologiques),
- caractéristiques variétales (sensibilité à la photopériode et à la vernalisation),
- pratiques culturales (date de semis).

Dans le cadre de cette étude, on se limite aux facteurs mentionnés entre parenthèses qui sont disponibles soit grâce aux stations météorologiques soit grâce aux enquêtes terrain.

Les réflectances sont prédites pour deux années successives pour 4 parcelles de blé d'hiver. Le but de cette section est de reproduire le profil temporel du signal radiométrique qui peut être observé par satellite dans différentes conditions climatiques et différentes conditions de date de semis et de variété. En particulier, on vérifie si le calendrier phénologique est correctement reproduit sur les réflectances de parcelles individuelles, en comparaison avec des observations SPOT HRV.

Ensuite, on étudie les variations inter-annuelles de réflectances pour les 4 parcelles dues aux variations de variété, de date de semis, et de conditions météorologiques.

Parmi les parcelles enquêtées, nous avons sélectionné des parcelles (tableau II-2) semées de blé d'hiver pendant les deux années successives étudiées (1991 et 1992). D'une année à l'autre, ces parcelles ont été semées avec différentes variétés, à différentes dates, et étaient sous des conditions climatiques différentes.

Comme dans la section précédente, les modèles AFRCWHEAT2 et SAIL sont utilisés conjointement pour simuler les réflectances. Nous ne discuterons pas ici le choix d'une distribution foliaire sphérique (Bunnik, 1978) qui a été justifié précédemment. Pour les observations SPOT, l'erreur due à l'atmosphère est représentée sur chaque graphe. La sensibilité des réflectances aux entrées du modèle de correction atmosphérique a été évaluée au cours du Chapitre précédent (tableau II-10).

III-3.1. Sensibilité du LAI aux pratiques culturales et aux conditions d'environnement

D'après les mesures terrain effectuées sur les parcelles enquêtées, la date de semis varie du jj 277 (4 octobre) au jj 321 (17 novembre). Pour les variétés représentées, $Psat$ (sensibilité à la photopériode) varie de 16 à 20, $Vsat$ (sensibilité à la vernalisation) de 20 à 40. On a effectué une étude de sensibilité du LAI à chaque paramètre en utilisant les valeurs extrêmes observées sur les parcelles enquêtées. La figure III-4 montre l'impact de chacun de ces paramètres et des conditions météorologiques sur le profil temporel de LAI.

Pour chaque figure, un seul facteur varie. Une variation de l'un de ces paramètres a un impact sur l'évolution temporelle du LAI et induit un décalage du calendrier phénologique de la plante. Pour $Psat$ et $Vsat$, une variation du phasage temporel pendant la phase de montée du LAI n'est observée que lorsque ces caractéristiques ont des valeurs plus faibles que les valeurs de référence. Pour la date de semis, une variation vers les dates plus précoces a un impact sur le phasage temporel bien plus important qu'une variation vers les dates plus tardives, par rapport à la date de référence.

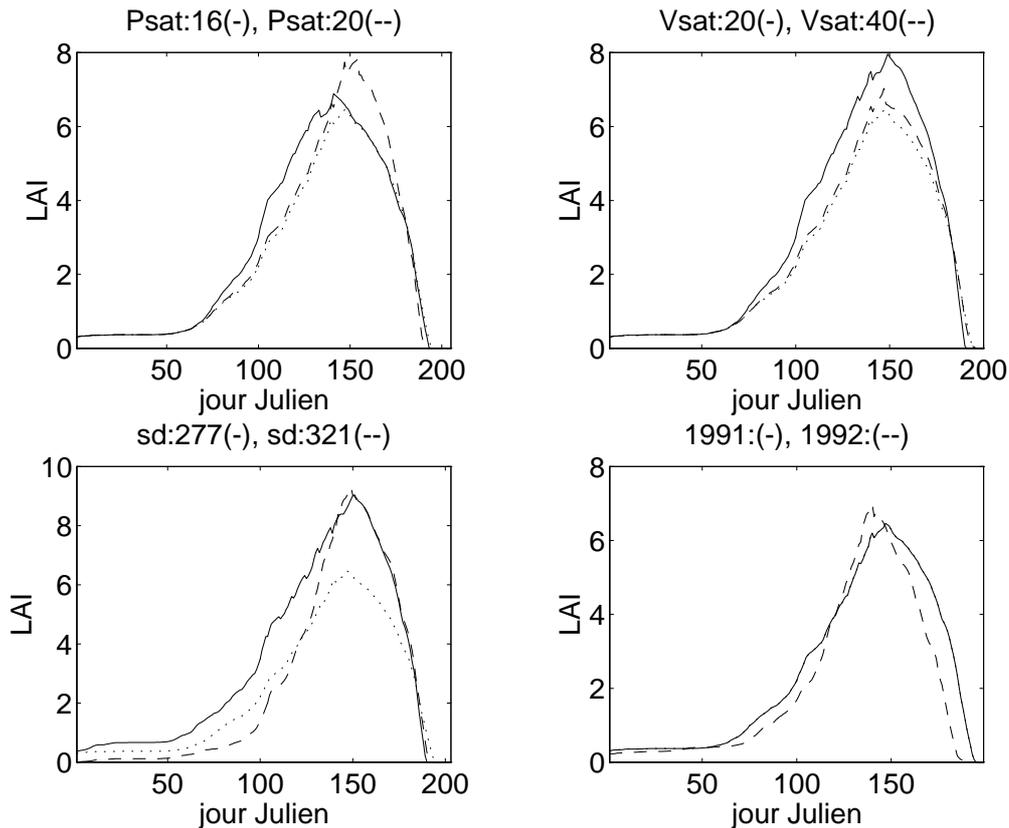


Figure III-4 : Sensibilité du LAI modélisé à la date de semis, la variété et les conditions météorologiques. Les paramètres sont seulement indiqués s'ils diffèrent de la configuration de référence (..). La configuration de référence est date de semis : jj 288, Psat : 18, Vsat : 30, conditions climatiques de 1991. Simulations effectuées avec le modèle AFRCWHEAT2.

III-3.2. Variabilité inter-annuelle des réflectances/NDVI

On utilise les paramètres d'AFRCWHEAT2 présentés dans le tableau II-2 pour simuler le profil temporel de LAI pour les 4 parcelles étudiées en 1991 et 1992 (fig. III-5).

Dans chaque cas, les caractéristiques de culture et/ou la date de semis varient d'une année à l'autre. On note une variabilité dans l'évolution temporelle du LAI pour les 4 parcelles.

Les séries temporelles de LAI sont utilisées en entrée du modèle SAIL pour simuler les réflectances (fig. III-6) et le NDVI (fig. III-7) dans les bandes de longueurs d'onde de SPOT, comme décrit dans la section précédente. Pour un jour donné, la simulation a été effectuée dans des conditions de visée au nadir, excepté pour les dates d'acquisition SPOT où les conditions angulaires d'acquisition ont été utilisées.

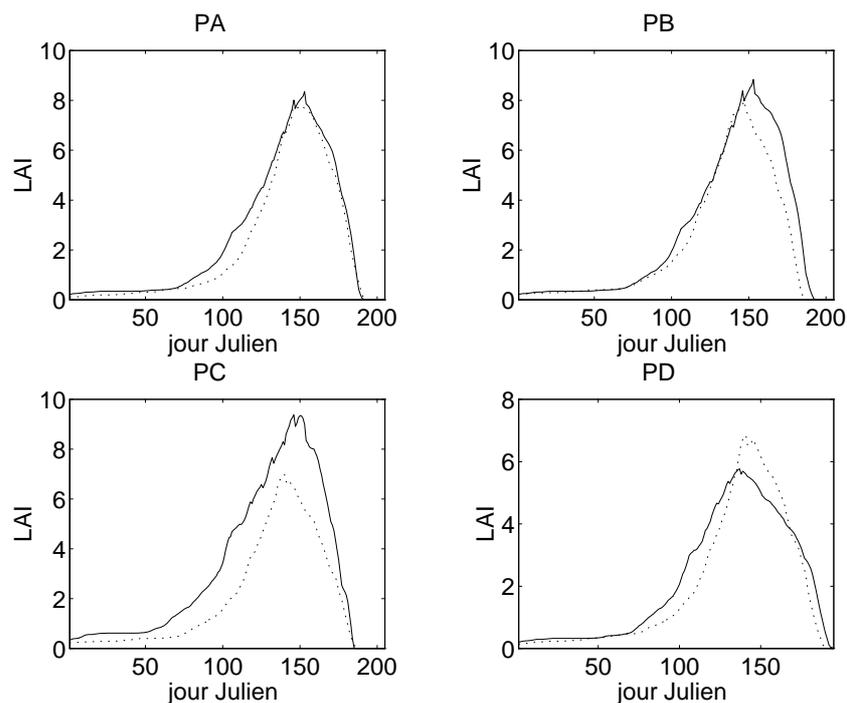


Figure III-5 : Profils temporels de LAI simulés pour 4 parcelles en 1991 (-) et en 1992 (..). Caractéristiques des parcelles décrites dans le tableau II-2. Simulations effectuées avec le modèle AFRCWHEAT2.

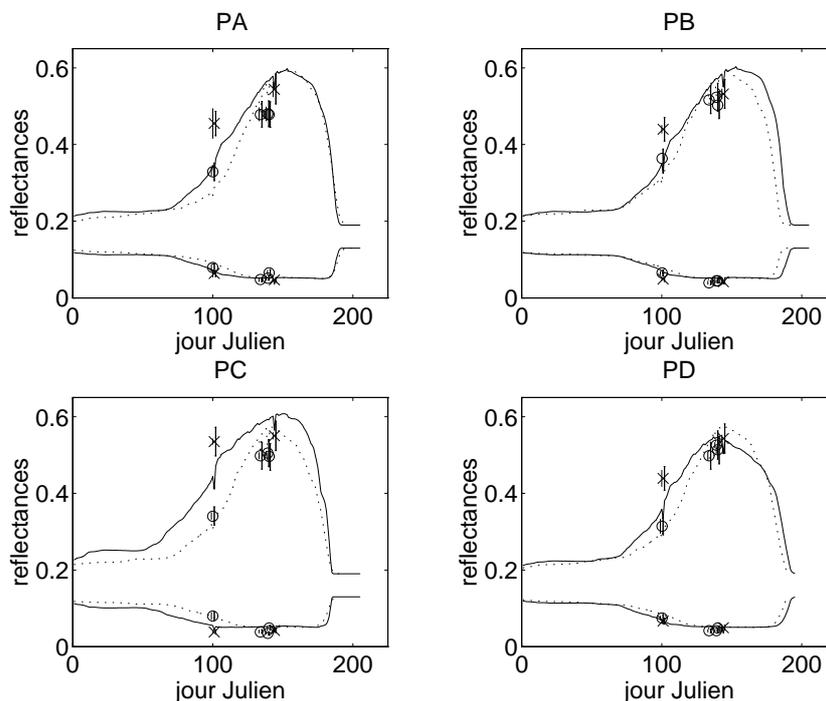


Figure III-6 : Profils saisonniers de réflectances modélisées pour 4 parcelles, en 1991 (-) et en 1992 (..), mesures SPOT +/- 1 écart-type (o) et +/- 1 erreur due à l'atmosphère (x), pour 2 (x) dates d'acquisition en 1991 et 4 (o) en 1992. Caractéristiques des parcelles décrites dans le tableau II-2. Simulations effectuées dans des conditions de visée au nadir, sauf aux dates d'acquisition des données SPOT où les angles d'acquisition sont utilisés. Courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

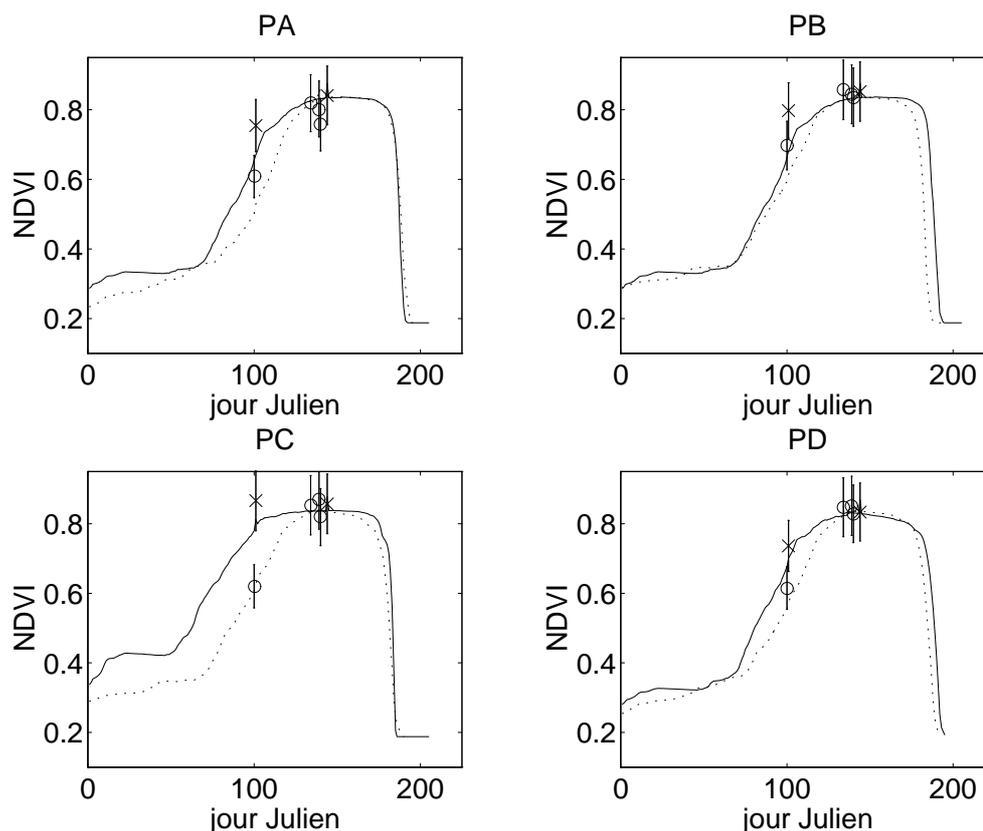


Figure III-7 : Profils temporels de NDVI modélisés (-) en 1991 et (..) en 1992, et observés (x) en 1991 et (o) en 1992, pour 4 parcelles. Simulations effectuées en utilisant la même procédure que pour la figure III-6.

Pour chaque parcelle (figs. III-6 et III-7), les profils temporels de réflectances et de NDVI sont décalés de façon cohérente : dans chaque cas, les profils temporels de 1991 précèdent les profils temporels de 1992. Le décalage peut être dû à divers facteurs (date de semis, variété, et conditions météorologiques). Pour une année donnée, on ne peut pas aisément déduire une tendance générale de la période de semis et des variétés privilégiées à partir de la distribution des dates de semis et des variétés (figs. II-4 et II-5). En revanche, la figure II-11 montre que si les températures moyennes de l'air et le rayonnement solaire ne varient pas de façon significative d'une année à l'autre, les précipitations sont assez différentes. Les précipitations ont été beaucoup plus abondantes de septembre 90 à septembre 91, que de septembre 91 à septembre 92. La différence entre les deux années est de plus en plus grande d'avril à septembre. La saison 1991/1992 a été plus sèche, et également plus fraîche de septembre à décembre que la saison 1990/1991, ceci a en partie induit le décalage inter-annuel observé sur les figures III-5, III-6 et III-7.

Les figures III-6 et III-7 montrent également la comparaison entre les réflectances et NDVI simulés avec les valeurs SPOT HRV observées pour chaque date d'acquisition, au cours des deux saisons végétatives. L'accord entre la simulation et l'observation est globalement satisfaisant. Le décalage temporel simulé entre les deux années est en accord avec les observations pour les 4 parcelles. On note qu'il y a un problème d'amplitude concernant les simulations en avril dans le PIR, qui sont cependant cohérentes d'une année à l'autre.

Une comparaison entre les figures III-6 et III-7 montre que le NDVI atténue fortement l'influence des effets directionnels. Le NDVI permet aussi de réduire l'impact de la variabilité de la réflectance du sol. Malgré une fluctuation temporelle des réflectances du sol dans le visible et le PIR principalement due à l'humidité et à la rugosité, la différence entre les réflectances visibles et PIR reste constante (Richardson and Wiegand, 1977). Donc le NDVI est moins dépendant de la variation temporelle du sol que ne le sont les réflectances.

III-3.3. Variation inter-annuelle d'un seul paramètre

En utilisant les 8 configurations (4 parcelles sur 2 ans) dont on dispose, on estime la variation de réflectances ou de NDVI due à la variation d'un seul des facteurs considérés (date de semis/variété/forçage climatique). On estime également l'impact de ces variations sur la productivité.

variation de date de semis

Entre les configurations PC92 et PD92, seule la date de semis varie (8 jours). La figure III-8 montre que la variation de date de semis a un impact sur le phasage des profils de réflectance PIR simulés cohérent avec la variation obtenue sur les observations (PC est plus précoce que PD). En revanche, pour le visible et ainsi pour le NDVI, le décalage des profils temporels simulés n'est pas visible sur les observations du mois d'avril.

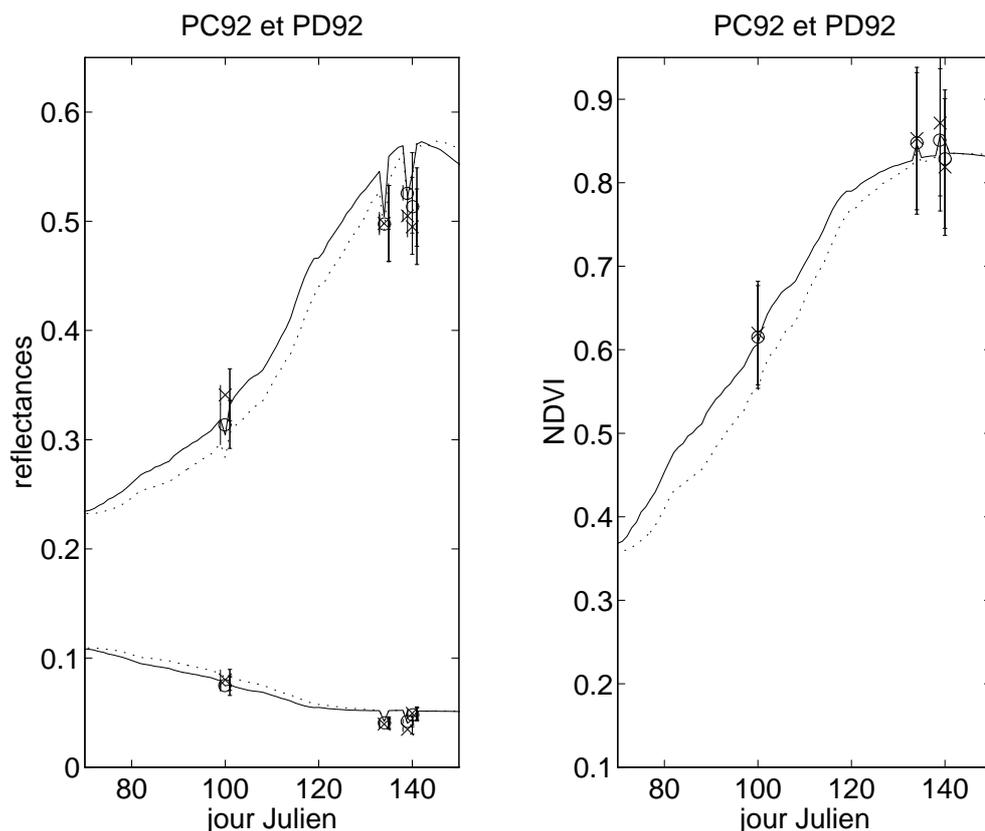


Figure III-8 : Profils saisonniers (a) de réflectances, [courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible], et (b) de NDVI PC92 (-) et PD92 (..), mesures SPOT +/- 1 écart-type (I) et +/- 1 erreur due à l'atmosphère (I), pour PC92 (x) et PD92 (o). Caractéristiques des parcelles décrites dans le tableau II-2. Simulations effectuées dans des conditions de visée au nadir, sauf aux dates d'acquisition des données SPOT où les angles d'acquisition sont utilisés. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

variation de caractéristiques variétales

Entre les configurations PB92 et PC92, parmi les facteurs que l'on contrôle, seules les caractéristiques variétales varient. Les profils simulés sont quasiment similaires dans les deux cas (figure III-9). On peut ici émettre une hypothèse permettant d'expliquer ce phénomène. En effet, on note que lorsque l'on passe des configurations PB92 à PC92, le P_{sat} diminue et le V_{sat} augmente. Il peut ainsi y avoir un phénomène de compensation (pour la modélisation) au niveau de la croissance qui se reflète sur la réflectance résultante.

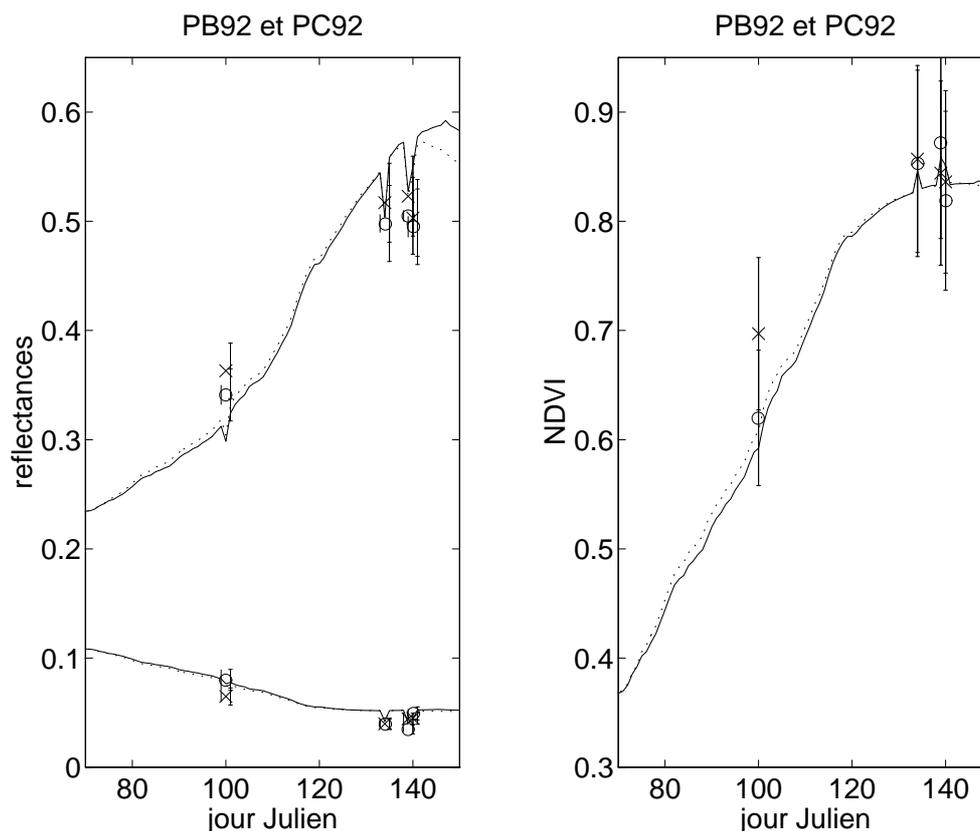


Figure III-9 : Profils saisonniers (a) de réflectances, [courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible], et (b) de NDVI PB92 (-) et PC92 (..), mesures SPOT ± 1 écart-type (|) et ± 1 erreur due à l'atmosphère (I), pour PB92 (x) et PC92 (o). Caractéristiques des parcelles décrites dans le tableau II-2. Simulations effectuées dans des conditions de visée au nadir, sauf aux dates d'acquisition des données SPOT où les angles d'acquisition sont utilisés. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

variation du forçage climatique

Entre les configurations PA91 et PA92, outre la variation du forçage climatique (fig. II-11), il y a une variation de 5 jours de la date de semis, cette variation s'effectue vers des dates très tardives. On montre que cette variation a peu d'impact sur les profils de réflectances et sur la productivité (fig. III-10).

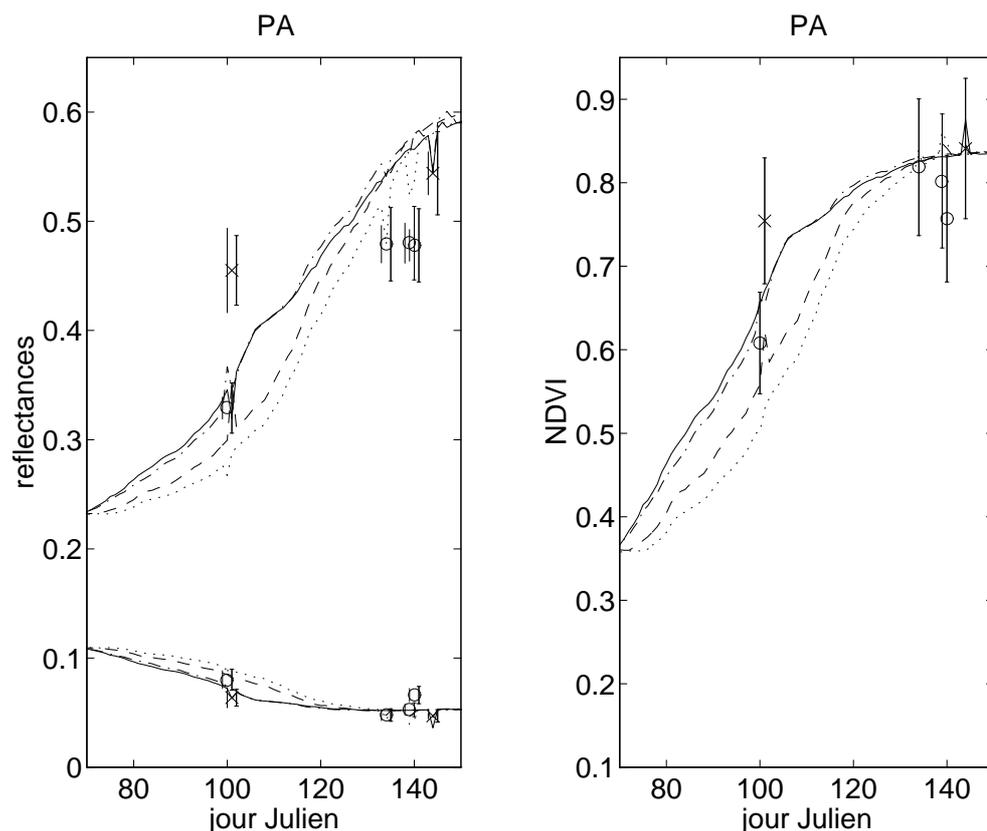


Figure III-10 : Profils saisonniers (a) de réflectances, [courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible], et (b) de NDVI pour PA91 (-), PA92 (..), PA91 avec la météorologie de 1992 (- -) et PA92 avec la météorologie de 1991 (-.), mesures SPOT ± 1 écart-type (I) et ± 1 erreur due à l'atmosphère (I), pour PA91 (x) et PA92 (o). Caractéristiques des parcelles décrites dans le tableau II-2. Simulations effectuées dans des conditions de visée au nadir, sauf aux dates d'acquisition des données SPOT où les angles d'acquisition sont utilisés. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

En effet, le résultat obtenu en simulant la configuration PA92 avec la météorologie de 91 est proche de celui obtenu pour la configuration PA91. La similitude est toutefois moins marquée pour la configuration PA91 simulée avec la météorologie de 92 et comparée aux résultats de la configuration PA92. Dans ce cas là, la plus grande variabilité du phasage des réflectances et NDVI est tout de même due à la variation de forçage climatique. La variation de phasage du signal radiométrique simulé est en accord avec la variation obtenue pour les observations (1991 est plus précoce que 1992).

N'ayant à notre disposition qu'une seule observation pendant la phase de croissance du signal radiométrique (en avril) les résultats obtenus permettent d'émettre des hypothèses plutôt que de conclure. De plus, le phasage du signal radiométrique peut être influencé par

une caractéristique que l'on ne contrôle pas. Dans les 3 cas évoqués, la variation d'un des facteurs (date semis, variété ou forçage climatique) engendre une variation de productivité estimée par le modèle (tableau III-1).

	configuration	rendement	NPP	configuration	rendement	NPP
variation de date semis	PC92	88	2775	PD92	86	2819
variation de variété	PB92	83	2831	PC92	88	2775
variation de météo	PA91	77	2969	PA92	87	2894

Tableau III-1 : Comparaison de la productivité (rendement en qx.ha-1 et NPP en gCO2.m-2.y-1) lorsque un seul des facteurs considérés (date semis, variété, météorologie) varie. Site Beauce.

III-3.4. Sensibilité des réflectances/NDVI aux paramètres de SAIL

L'étude de sensibilité effectuée sur les paramètres de SAIL dans le Chapitre II permet de dresser des hypothèses pour expliquer la différence d'amplitude des réflectances et NDVI entre la modélisation et l'observation en avril. On note (fig. III-6) que pour les deux années et les quatre parcelles, la réflectance du couvert est sous-estimée dans la longueur d'onde du PIR.

L'incertitude sur l'estimation des réflectances est en partie due à l'hypothèse d'une réflectance de sol constante au cours du temps. On fait alors l'hypothèse que la réflectance de sol introduite dans le modèle dans le PIR est incorrecte. Pour l'année 1992 et la parcelle B, pour laquelle la différence simulation/observation en avril est grande, on ajuste la réflectance PIR du sol pour minimiser la différence entre la simulation et l'observation satellitaire. Bien que 4 observations soient disponibles, comme les 3 dates d'acquisition en mai sont très rapprochées dans le temps, on utilise seulement deux dates d'acquisition (9 avril et 13 mai). La valeur initiale de la réflectance PIR était 0.19, d'après la valeur trouvée à partir des images SPOT. Le meilleur ajustement entre la simulation et les observations a été obtenu avec une réflectance de sol dans le PIR de 0.27.

La seconde hypothèse est basée sur l'erreur engendrée par le modèle de fonctionnement utilisé. On note ici que la différence d'amplitude des réflectances et NDVI modélisés et observés en avril peut être due à la mauvaise prédiction du phasage temporel par AFRCWHEAT (faiblesse du développement) qui a été mentionné dans le Chapitre II (fig. II-12).

III-4. CONCLUSION

simulation directe

Des profils temporels de réflectance à l'échelle satellitaire ont été simulés en utilisant un modèle de transfert radiatif combiné à un modèle de croissance de culture. Une analyse à l'échelle du champ s'est avérée indispensable pour la validation du couplage entre les modèles de croissance de végétation et de transfert radiatif. Les informations disponibles consistaient en une classification d'occupation du sol et une surveillance terrain qui a fourni la date de semis et la variété des principales cultures. Pour des conditions climatiques et des pratiques culturales données, le modèle de croissance prédit l'indice foliaire du blé d'hiver. Le LAI permet le lien entre le modèle de croissance de culture avec un modèle de réflectance de couvert, qui prédit le profil temporel des observations satellitaires. Les profils temporels simulés ont été comparés avec les observations SPOT pour déterminer une distribution d'angles foliaires adaptée au blé d'hiver. Puis, la confrontation des profils temporels de réflectances observées et prédites montre la pertinence de la méthodologie de simulation que nous avons utilisée, même lorsque le nombre d'images SPOT est faible. A l'échelle de la parcelle, nous avons prédit les réflectances observées avec le capteur HRV de 20 m de résolution du satellite SPOT. On conclut que le couplage entre un modèle de croissance et un modèle optique nous permet de reproduire les réflectances visible et PIR observées par des capteurs comme SPOT HRV à l'échelle de la parcelle. Toutefois, des améliorations sont nécessaires pour modéliser avec précision l'inclinaison des feuilles au cours de la saison de croissance et pour simuler une surface non-homogène : en particulier l'impact des zones d'ombre, les effets d'adjacence, l'anisotropie du sol et la couverture fractionnaire de la végétation.

variations inter-annuelles

Les simulations de réflectance et NDVI ont été effectuées pour deux années consécutives avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL. Des observations satellitaires SPOT étaient disponibles pour 4 (en 1991) et 2 (en 1992) dates durant deux saisons culturales de blé d'hiver. Les profils temporels des réflectances observées sur les images SPOT HRV ont été reproduits pour 8 parcelles de blé d'hiver (4 parcelles et 2 années) avec différentes combinaisons de date de semis/caractéristiques variétales.

La variabilité inter-annuelle de certains paramètres, qui ont une importance dans le processus de photosynthèse de la plante, peut affecter la production de la culture sans avoir d'impact sur les réflectances. L'influence de tels paramètres sur les processus biophysiques ne sera pas détectée à partir de mesures satellitaires. Cependant, on a montré que l'impact d'une variation des paramètres agissant sur la phénologie de la plante (date de semis, caractéristiques variétales, et conditions météorologiques) peut être reproduit. Pour 4 parcelles de blé d'hiver, les variations inter-annuelles des observations SPOT ont été reproduites pour deux années successives. On attribue le problème de simulation du signal radiométrique pendant la phase de croissance soit à une mauvaise paramétrisation des propriétés optiques du sol, soit à une faiblesse du développement tel qu'il est simulé par le modèle de fonctionnement.

De par ses qualités concernant l'atténuation de divers effets perturbateurs (effets directionnels et variabilité temporelle des réflectances de sol), le NDVI est fréquemment utilisé à la place des réflectances.

L'étude permet de vérifier que les variations temporelles des pratiques culturales et des conditions environnementales induisent des variations temporelles à la fois sur les réflectances et sur le NDVI. Cette conclusion est importante dans la perspective d'intégration d'observations satellitaires (réflectances ou NDVI) dans un modèle de culture dans le but de retrouver des conditions initiales (Chapitre IV).

CHAPITRE IV

ASSIMILATION D'OBSERVATIONS RADIOMETRIQUES - HAUTE RESOLUTION SPATIALE

IV-1. INTRODUCTION

On présente ici une étude de faisabilité concernant l'intégration des données télédéetectées dans les modèles de culture, dans le but de retrouver des paramètres pertinents qui déterminent le comportement du couvert végétal et la production et qui ne peuvent pas être directement obtenus à partir d'observations satellitaires. Les données satellitaires sont dans un premier temps utilisées pour suivre le développement du couvert (Chapitre III), et ensuite pour ajuster des paramètres qui sont nécessaires à la simulation de la croissance du couvert. En utilisant les techniques d'assimilation de données satellitaires dans les courtes longueurs d'onde, on espère retrouver les paramètres qui contrôlent le comportement saisonnier de la végétation. Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, l'estimation de paramètres importants et méconnus à l'échelle régionale permettrait de généraliser l'utilisation d'un modèle de culture. Cette étude de faisabilité pour l'utilisation de techniques d'assimilation en utilisant des données satellitaires se situe donc dans une perspective d'ajustement de paramètres non disponibles à partir de surveillance terrain à l'échelle régionale sur de grandes zones agricoles. Néanmoins, l'utilisation de mesures satellitaires implique de tenir compte des perturbations dues à l'influence de l'atmosphère.

La première partie présente les résultats obtenus pour un cas d'étude : des parcelles de blé d'hiver de la région de la Beauce sur 2 années consécutives, avec respectivement 2 et 4 observations SPOT HRV en 1991 et en 1992. Selon la technique d'assimilation décrite au Chapitre I, on minimise, par ajustement de la date de semis, la différence entre les réflectances simulées et les mesures télédéetectées. Les dates retrouvées sont ensuite utilisées en entrée du modèle de fonctionnement pour estimer la production primaire et le rendement de la culture. Aux vues des résultats obtenus dans ce cas réel, on utilisera dans une seconde partie des observations synthétiques afin de déterminer la fréquence, et le nombre d'observations qu'il est souhaitable d'avoir pour un meilleur ajustement. On considérera également l'impact d'une erreur affectant l'observation, sur la date ajustée.

La question essentielle soulevée ici est la suivante : Peut-on retrouver les variations des paramètres liés à la culture ou au forçage climatique, par couplage modèles/observations

(Kergoat et al., 1995). Dans l'affirmative, quel type d'observation est-il judicieux d'utiliser en terme d'échantillonnage temporel, de nombre d'observations, de dates d'acquisition et de précision de la mesure?

IV-2. ASSIMILATION D'OBSERVATIONS SPOT HRV

En entrée du modèle de fonctionnement, on utilise successivement un jeu de plusieurs dates initiales choisies soit par :

- pas de temps de 10 jours sur une période de +/- 30 jours autour de la date de référence dans le cas de l'utilisation d'une procédure de minimisation (assimilation d'observations SPOT).
- balayage au pas de temps quotidien sur une période de +/- 30 jours autour de la date de référence (approche méthodologique),

IV-2.1. Résultats pour 8 configurations

On applique la procédure d'assimilation sur 4 parcelles enquêtées du site de la Beauce pour les années 1991 et 1992. En entrée du modèle de fonctionnement, on utilise successivement les dates initiales (pas de temps de 10 jours sur une période de +/- 30 jours autour de la date de semis réelle), et la procédure de minimisation.

Les résultats sont regroupés dans le tableau IV-1 en terme de différence entre la date de semis obtenue après ajustement et la date de semis réelle. La procédure d'assimilation a été utilisée en intégrant d'une part les réflectances visible et PIR (cas 1), et d'autre part les NDVI (cas 2). On note tout d'abord que l'on ne retrouve pas la date de semis réelle systématiquement. Les meilleurs ajustements sont obtenus pour les cas où les profils temporels de réflectances ou de NDVI simulés reproduisent le plus fidèlement l'observation (figs. III-6 et III-7).

	cas 1		cas 2	
	1991	1992	1991	1992
PA	-18	*	+4	+4
PB	-13	-5	-7	+1
PC	*	+10	*	+19
PD	-18	+3	*	+11

Tableau IV-1 : Résultats de l'ajustement de la date de semis (avec 7 dates initiales). Décalage entre la date de semis réelle et la date de semis ajustée retrouvée par assimilation d'observations. Tests effectués pour 4 parcelles, en 1991 et 1992. Les cas 1 et 2 correspondent aux résultats en jours obtenus après assimilation respectivement des réflectances visible et PIR, et du NDVI. Ces décalages sont calculés avec la date la plus fréquemment retrouvée avec les 7 dates initiales, * signifie que la date de semis ajustée ne converge pas vers une seule et même date. Site Beauce.

Toutefois, il convient de rester prudent quant à l'interprétation de ces résultats : nous disposons de trop peu d'observations satellitaires (2, ou 4 dont 3 très proches, acquisitions dans chaque cas) pour espérer ajuster un paramètre avec précision. En outre, plus le nombre d'acquisitions est faible, plus l'erreur résiduelle sur chaque simulation prend de l'importance.

IV-2.2. Cas détaillé d'une parcelle

Les résultats sont détaillés pour la parcelle D en 1992. Deux raisons ont guidé le choix de cette configuration : (i) la simulation des réflectances reproduit correctement les observations (fig. III-6) et l'ajustement de la date de semis est correct, (ii) cette parcelle correspond à la variété 'Soissons' qui est la plus représentée sur la région.

Quatre scènes SPOT HRV sont utilisées pour ajuster la date de semis sur cette parcelle. La date de semis réelle est le 23 octobre (jj 296). On note (tableau IV-2) une légère sensibilité des résultats de l'algorithme à la date de semis initiale (sur une période de 2 mois). L'ajustement effectué avec 7 dates initiales converge vers une même date de semis (jj 299), 3 jours après la date de semis réelle.

La date de semis retrouvée a été introduite dans le modèle de fonctionnement pour calculer les profils temporels de réflectances (fig. IV-1).

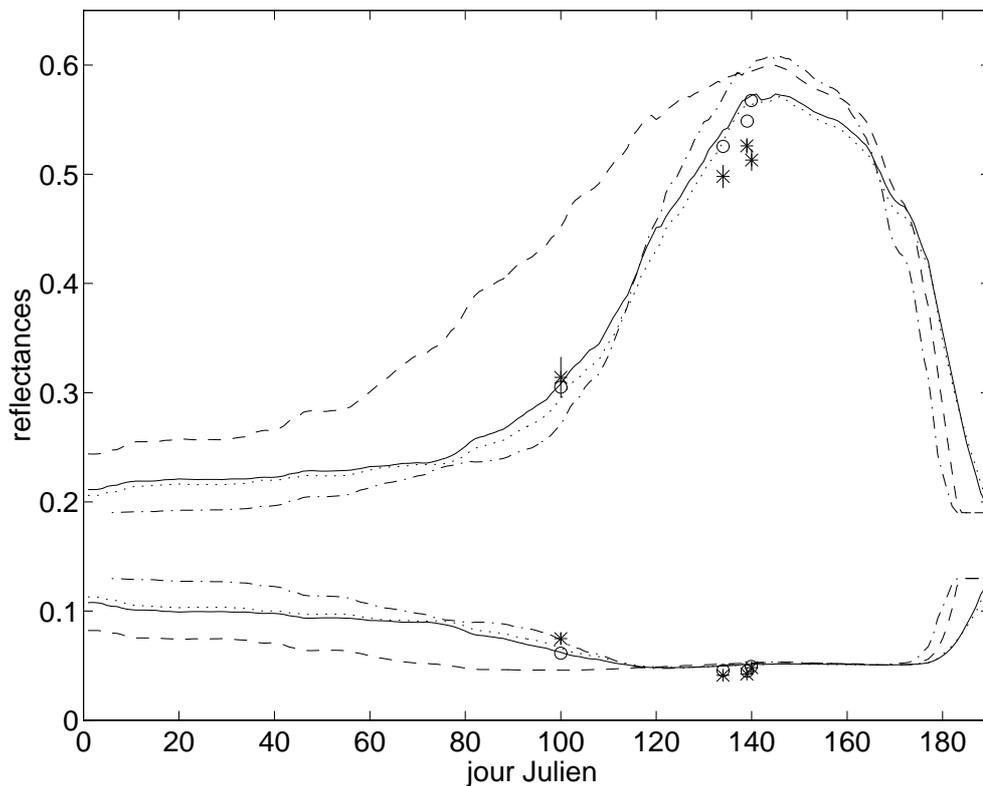


Figure IV-1 : Profils saisonniers de réflectances. (*) sont les observations SPOT-HRV sur la parcelle ± 1 écart-type. Simulations obtenues avec la date de semis (-, o) : réelle (jj 296), (:): ajustée (jj 299), (--): initiale la plus précoce (jj 266), et (-.): initiale la plus tardive (jj 326). Courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL, entrées : paramètres résumés dans le tableau II-3, variété Soissons, conditions de visée au nadir sauf (o) qui sont calculées avec les conditions d'acquisition SPOT.

En avril, la simulation des réflectances est en accord avec les observations, alors qu'il y a un décalage en mai, à la fois sur les profils temporels de référence et ajustés (fig. IV-1).

Les profils ajustés, obtenus en utilisant pour la date initiale une gamme de deux mois autour de la date de semis de référence, sont proches des profils de référence.

En utilisant les dates de semis initiales, on estime la NPP et le rendement avec le modèle AFRCWHEAT2 (tableau IV-2). On note une variation de la NPP saisonnière et du rendement avec la date de semis utilisée. Pour cette parcelle, une date de semis trop précoce engendre une plus grande erreur (18%) sur l'estimation de NPP qu'une date de semis plus tardive (-10%), on observe une tendance inverse pour le rendement (10% avec

une date trop précoce et -14% avec une date trop tardive). Dans les 2 cas, la productivité (en terme de NPP ou de rendement) est sous-estimée si la date de semis utilisée est trop tardive, et surestimée si elle trop précoce.

date de semis (jj)			NPP (gCO ₂ .m-2.y-1)		rendement (qx.ha-1)	
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
266	299.3	+3	3316	17.6%	94.4	10.3%
276	299.3	+3	3143	11.5%	88.7	3.6%
286	299.4	+3	2910	3.2%	90.7	6.0%
296	299.7	+4	2820	0.0%	85.6	0.0%
306	299.3	+3	2883	2.2%	89.8	4.9%
316	299.2	+3	2624	-7.0%	80.3	-6.2%
326	299.5	+4	2545	-9.8%	74.0	-13.6%

Table IV-2 : Résultats de l'ajustement de la date de semis en utilisant 7 dates initiales. Erreur relative entre la NPP ajustée et la NPP de référence : -2.8%. Erreur relative entre le rendement ajusté et le rendement de référence : 2.4%.

(a) : date de semis initiale

(b) : date de semis ajustée retrouvée par assimilation d'observations

(c) : décalage entre les dates de semis ajustée et réelle (jj 296)

(d) : NPP estimée obtenue avec la date de semis initiale

(e) : erreur relative entre la NPP estimée avec la date initiale et la NPP de référence (obtenue avec la date de semis réelle)

(f) : rendement estimé obtenu avec la date de semis initiale

(g) : erreur relative entre le rendement estimé avec la date initiale et le rendement de référence (obtenue avec la date de semis réelle).

La NPP estimée avec la vraie date de semis est 2820 gCO₂.m-2.y-1. L'erreur relative entre la NPP estimée avec les dates initiales et la date réelle atteint 17.6% si l'erreur sur la date de semis est de 30 jours, alors que l'erreur relative entre la NPP ajustée (2740 gCO₂.m-2.y-1) et la NPP de référence est -2.8%. Le rendement estimé avec la vraie date de semis est 85.6 qx.ha-1. L'erreur relative entre le rendement estimé avec les dates initiales et la date réelle atteint 13.6% si l'erreur sur la date de semis est de 30 jours, alors que l'erreur relative entre le rendement ajusté (87.7 qx.ha-1) et le rendement de référence est 2.4%. L'estimation du rendement que fournit l'enquête terrain est 79 qx.ha-1. La précision de

cette estimation étant faible, elle permet simplement de vérifier que l'ordre de grandeur de la simulation est correct.

L'expérience effectuée sur le cas particulier d'une parcelle pour laquelle plusieurs facteurs sont contrôlés (date de semis/variété/forçage climatique) permet de constater qu'une étude méthodologique est nécessaire afin de déterminer les périodes d'acquisition les plus favorables à l'ajustement d'un paramètre, ainsi que l'impact d'une erreur de mesure sur la qualité de l'ajustement.

IV-3. ASPECT METHODOLOGIQUE

Les observations synthétiques sont obtenues en utilisant le profil temporel de LAI de la simulation de référence (variété 'Soissons' semée le 15 octobre 1992 (jj 288)) dans des conditions de visée au nadir.

En entrée du modèle de fonctionnement, on utilise successivement les dates initiales choisies, par balayage au pas de temps quotidien sur une période de +/- 30 jours autour de la date de référence, c'est à dire 61 dates initiales. La date de référence est le 15 octobre 1992, cette date est la date de semis la plus fréquente d'après l'enquête terrain, elle a donc une grande représentativité régionale. Pour chaque date, on calcule la fonction coût et l'on déduit la date de semis qui minimise la différence entre la simulation et l'observation.

IV-3.1. Sensibilité des modèles couplés et de l'algorithme de minimisation à une variation de date de semis

Les figures IV-2 et IV-3 montrent les profils temporels de LAI (fig. IV-2) et de réflectance (fig. IV-3) obtenus pour 3 dates de semis correspondant à un décalage de +/- 1 un mois autour du jj 288 avec un pas de temps de 30 jours.

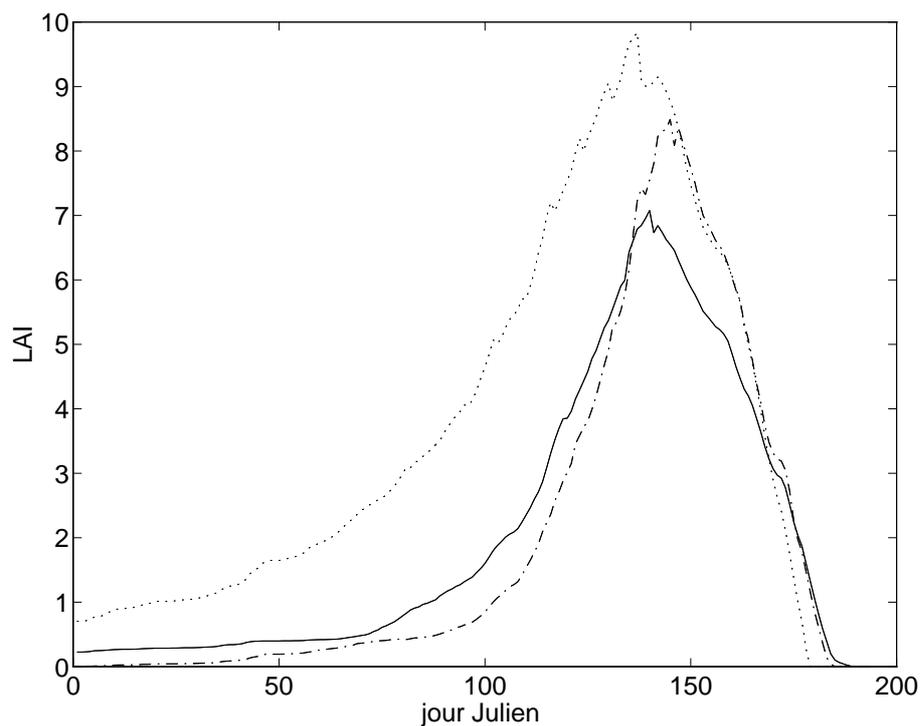


Figure IV-2 : Sensibilité du LAI à la date de semis : jj 258 (..), jj 288 (-), jj 318 (--). LAI obtenus avec le modèle AFRCWHEAT2 pour la variété Soissons.

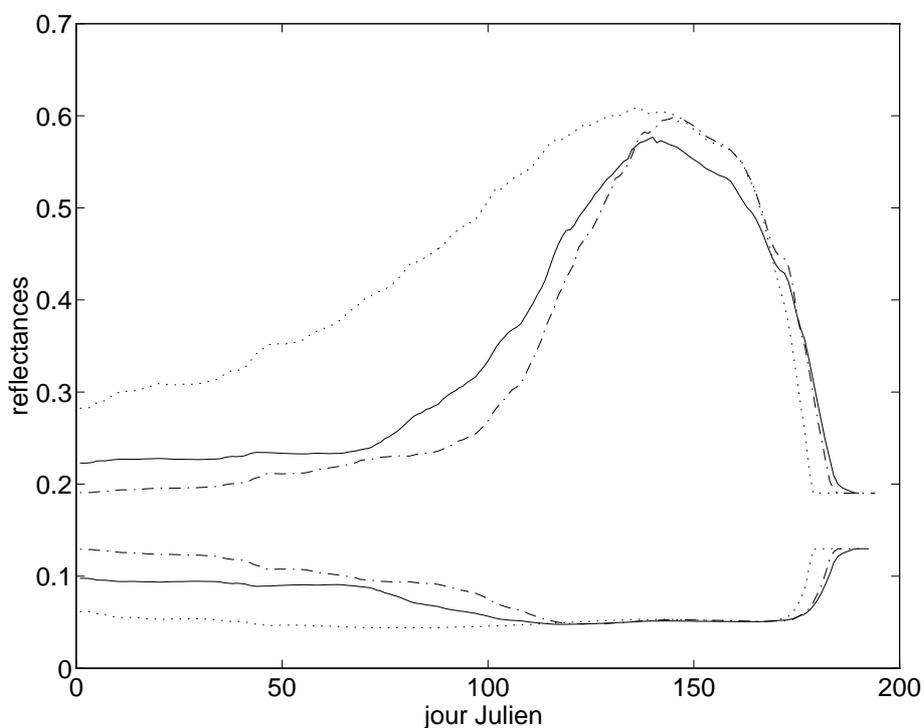


Figure IV-3 : Sensibilité des réflectances à la date de semis : jj 258 (..), jj 288 (-), jj 318 (--). Simulations effectuées dans des conditions de visée au nadir dans le canal visible (courbes inférieures) et le canal PIR (courbes supérieures), avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

Les NPP et les rendements sont calculés en utilisant en entrée du modèle de fonctionnement 7 dates de semis différentes (fig. IV-4). La date de semis centrale correspond au jj 288, les dates extrêmes correspondent à une variation de plus ou moins un mois par rapport à cette date centrale (pas de temps de 10 jours entre les différentes dates). On note une influence significative de la date de semis sur le LAI, variable caractéristique de la végétation (fig. IV-2), et également sur le profil temporel du signal radiométrique (fig. IV-3), variable que l'on peut obtenir par satellite. Une variation de la date de semis a également un impact sur les processus biophysiques conduisant à la fois à la NPP et au rendement (fig. IV-4).

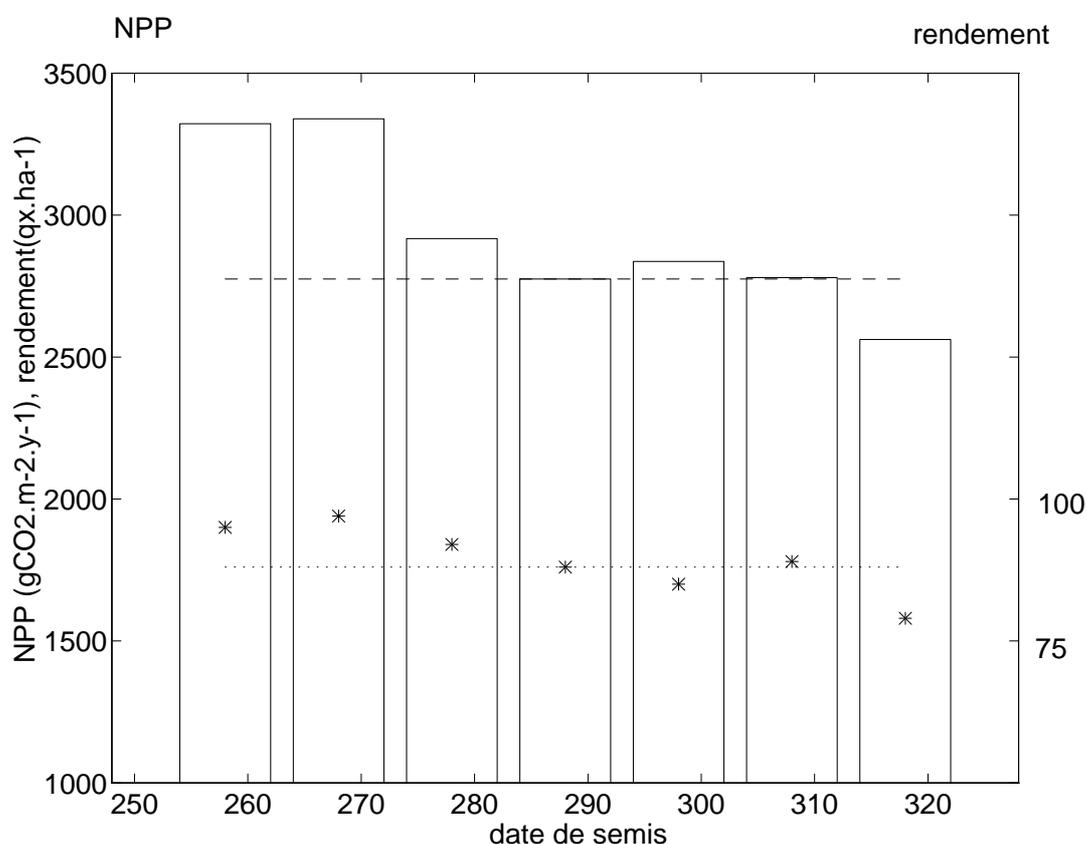


Figure IV-4 : Sensibilité de la Production Primaire Nette (-) et du rendement (*) à la date de semis. Comparaison avec les valeurs estimées de NPP (--) et de rendement (..) qui correspondent au profil de référence. NPP et rendements obtenus avec le modèle AFRCWHEAT2, pour la variété Soissons.

On note qu'une date de semis tardive conduit à de plus faibles variations de réflectances, de NPP et de rendement qu'une date plus précoce, en comparaison avec les résultats obtenus avec la date de référence (figs. IV-2, IV-3 et IV-4).

La variation de date de semis n'a pas la même influence en tout point du profil de LAI (fig. IV-2), on pressent ici que le nombre ainsi que la position des acquisitions auront une importance capitale pour la qualité de l'ajustement de la date de semis.

IV-3.2. Erreur engendrée par une méconnaissance de la variété sur l'ajustement de la date de semis

On se limite ici à l'ajustement d'un seul paramètre, la date de semis. Nous savons cependant que d'autres paramètres influencent le phasage temporel des réflectances. En particulier, nous voulons déterminer l'impact d'une méconnaissance d'un paramètre variétal sur l'ajustement de la date de semis. Le profil de référence est obtenu avec un Psat (sensibilité à la photopériode) de 18. On effectue alors l'ajustement de la date de semis avec 4 observations synthétiques (pas d'erreur sur la mesure) réparties tout au long du cycle (jj 40, 85, 125 et 160) en biaisant la modélisation : on fixe successivement Psat à 16 et à 20 (plage de variation de Psat obtenue sur les segments enquêtés) en entrée du modèle AFRCWHEAT2. Les fonctions coût obtenues sont comparées à la fonction coût obtenue en utilisant le Psat de référence (fig. IV-5).

Si l'on biaise le modèle, la fonction coût ne s'annule jamais (la simulation n'est jamais totalement conforme aux observations). Lorsque l'on fixe le Psat à 20, le minimum de la fonction coût est obtenu au jj 289. Ainsi, une erreur tendant à augmenter le Psat a peu d'influence sur l'ajustement. En revanche, si l'on fixe le Psat à 16, la fonction coût est minimale pour le jj 299. Une erreur de 11 jours (vers une date plus tardive) est obtenue sur l'ajustement de la date de semis. Dans une perspective d'étude à l'échelle régionale, il est clair qu'il faudrait ajuster aussi bien les caractéristiques variétales que la date de semis. Cependant, en pratique, nous sommes rapidement limités par le nombre d'observations satellitaires disponibles au cours d'une saison végétative.

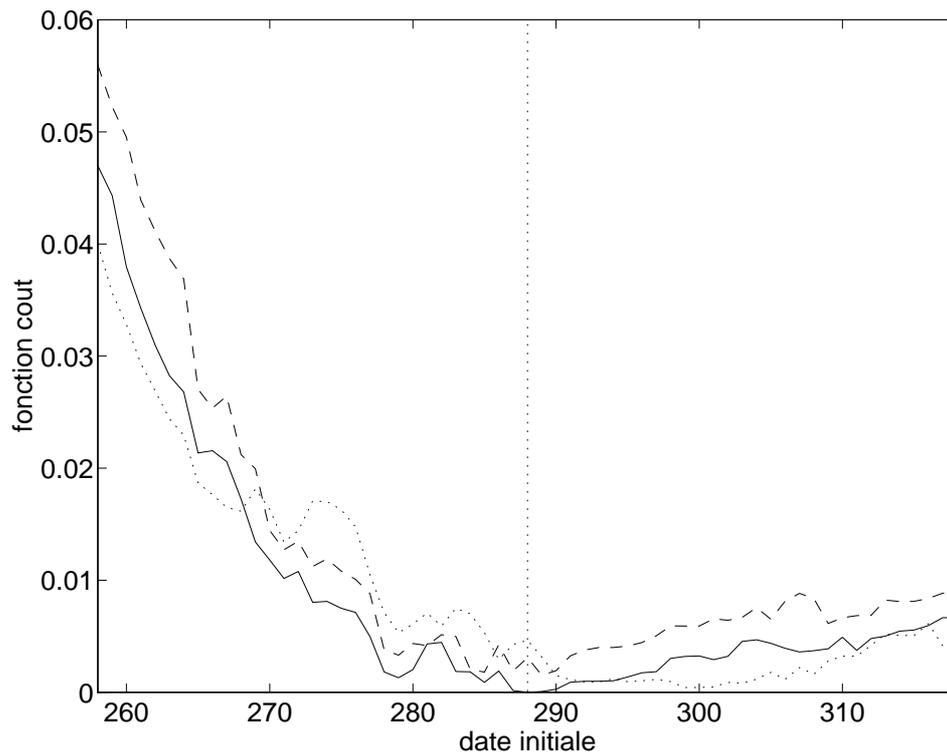


Figure IV-5 : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ([:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). Les résultats sont obtenus avec $Psat=18$ (-), $Psat=16$ (..) et $Psat=20$ (--). Les observations synthétiques utilisées correspondent à des acquisitions les jj 40, 85, 125 et 160. L'ajustement est effectué avec les réflectances visible et PIR.

IV-3.3. Echantillonnage temporel

On effectue l'assimilation de données synthétiques (sous formes de réflectances) en utilisant 4 fréquences temporelles différentes : 10, 20, 30 et 40 jours (fig. IV-6).

Ces données synthétiques sont parfaitement ajustées aux valeurs de référence (pas d'erreur sur la mesure). Ainsi dans chaque cas, la fonction coût est nulle pour la date de référence : la date retrouvée après ajustement est la date de référence (fig. IV-7).

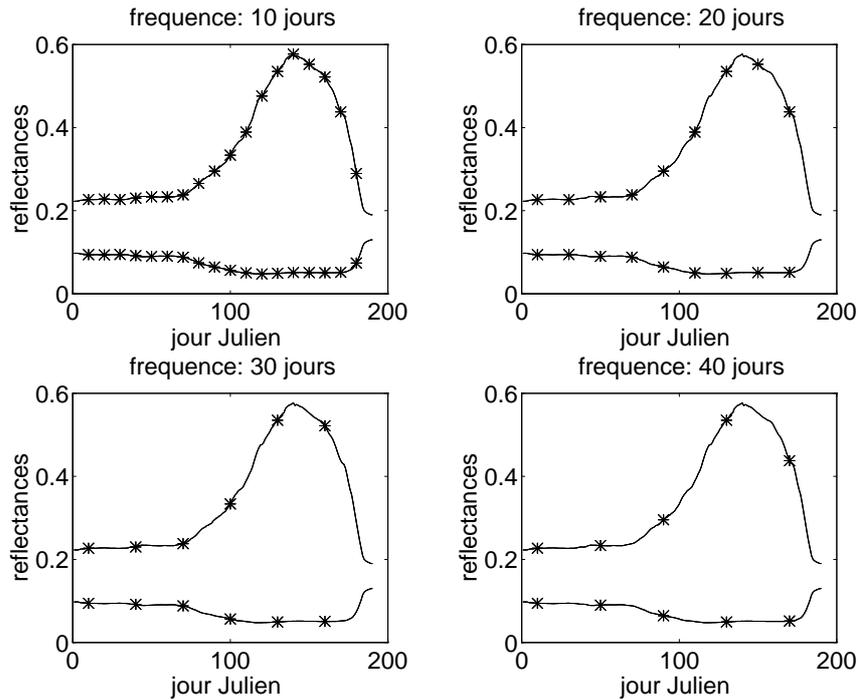


Figure IV-6 : Profils saisonniers de réflectances. Courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. (*) sont les observations synthétiques pour une fréquence temporelle de (a) 10 jours, (b) 20 jours, (c) 30 jours et (d) 40 jours. Simulation de référence (-) obtenue avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL, entrées : paramètres résumés dans le tableau II-3, conditions de visée au nadir, variété Soissons en 1992.

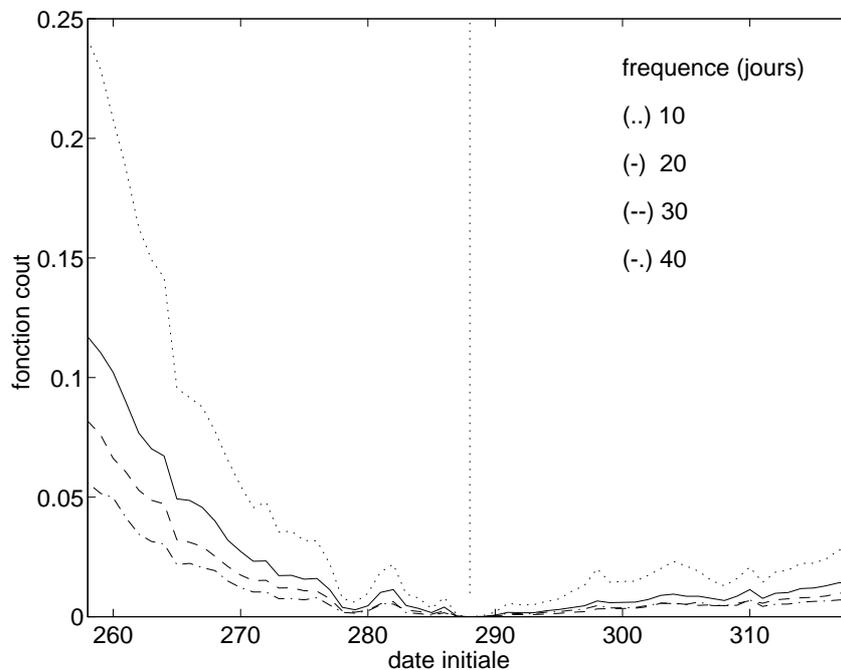


Figure IV-7 : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ((:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). Fréquence temporelle de (a) 10 jours, (b) 20 jours, (c) 30 jours et (d) 40 jours. L'ajustement est effectué avec les réflectances visible et PIR.

Dans notre exemple, les fréquences de 10, 20, 30 et 40 jours correspondent respectivement à 18, 9, 6 et 5 acquisitions au cours du cycle. On note que, comme on pouvait s'y attendre, plus la fréquence temporelle est élevée, plus le minimum de la fonction coût en fonction de la date de semis initiale est marqué. En particulier, on note une grande différence entre le profil obtenu avec une fréquence de 10 jours et ceux obtenus avec l'ensemble des autres fréquences. Donc, au niveau des résultats de l'ajustement, il n'a pas de différence majeure lorsque l'on utilise des fréquences de 20, 30 ou 40 jours, mais une amélioration significative est obtenue lorsqu'on passe d'une fréquence de 20 à 10 jours. Ceci s'explique par le fait que dans le cas d'une fréquence de 10 jours, le nombre d'acquisitions (18) est largement supérieur à celui obtenu dans les 3 autres cas.

IV-3.4. Nombre d'acquisitions

On découpe le cycle saisonnier de la végétation en 4 grandes phases. Ces périodes sont reportées sur les profils temporels des réflectances de référence (fig. IV-8). Voici une brève description de ces phases :

- (1) du stade de l'émergence au début de la montaison (du jj 0 au jj 65) : réflectances quasi-constantes,
- (2) du stade de début de montaison au stade de gonflement (du jj 65 au jj 103) : augmentation de la réflectance PIR et diminution de la réflectance visible,
- (3) du gonflement à l'épiaison puis à la floraison (jj 103 au jj 140) : augmentation de la réflectance PIR et diminution de la réflectance visible,
- (4) de la floraison à la sénescence complète (du jj 140 au jj 185) : diminution de la réflectance PIR et augmentation de la réflectance visible.

On distingue les périodes (2) et (3) car elles correspondent à une grande variation de réflectances, en particulier dans le PIR. Pour une période donnée, la date d'acquisition de l'observation synthétique se trouve au centre de la période.

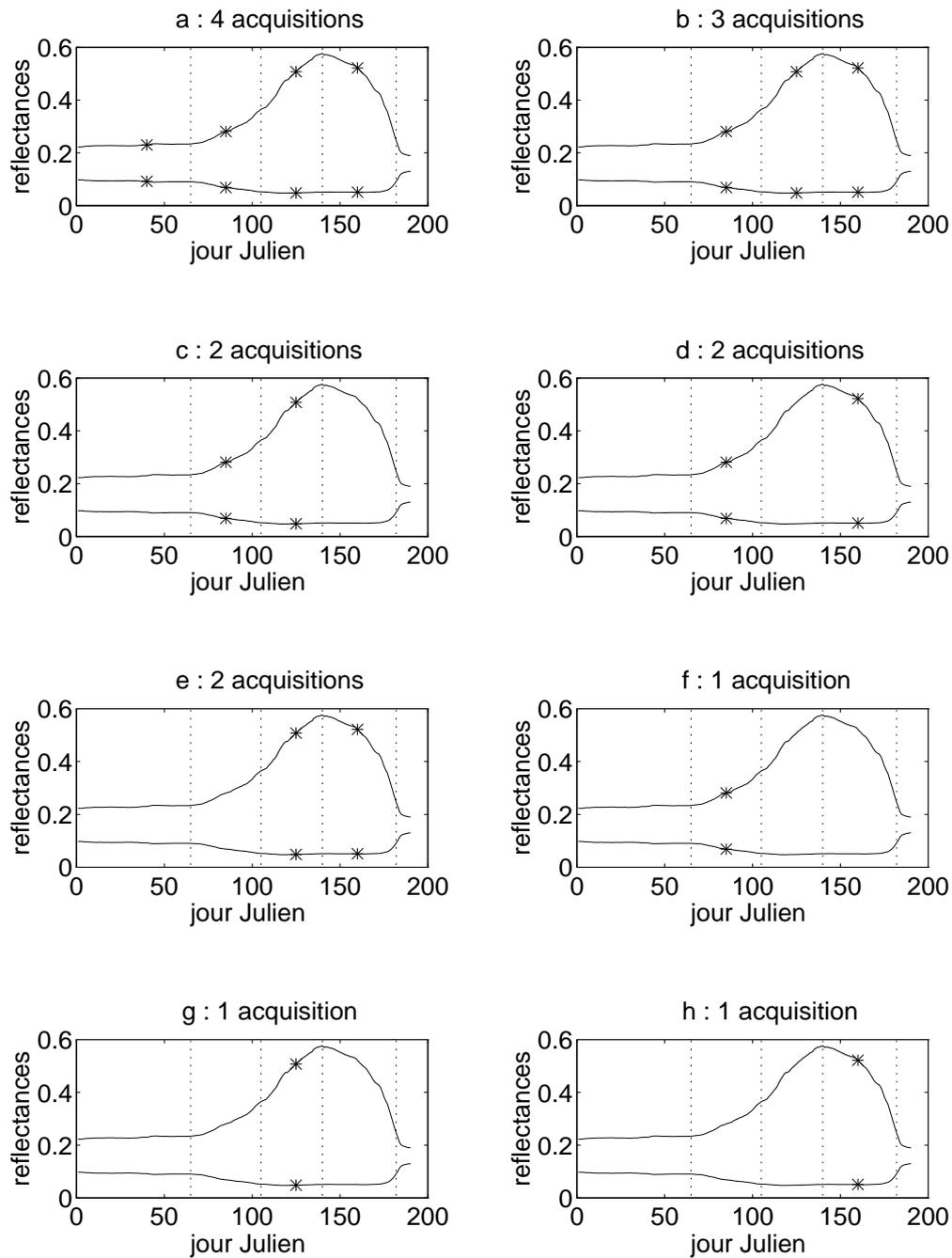


Figure IV-8 : Profils saisonniers de réflectances. Courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. (*) sont les observations synthétiques. 4 périodes sont délimitées (--). Simulation de référence (-) obtenue avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL, entrées : paramètres résumés dans le tableau II-3, conditions de visée au nadir, variété Soissons en 1992.

On suppose successivement que l'on dispose de 4 acquisitions (1 par période), 3 acquisitions (1 par période excepté pour la période 1), 2 acquisitions (3 combinaisons) et 1 acquisition (3 cas), voir figure IV-8. Premièrement, on note que dans la plupart des cas, plus on a d'acquisitions, plus la courbure de la fonction coût est marquée (fig. IV-9). Toutefois, la courbure de la fonction coût est plus marquée si l'on dispose d'une observation le jour 85 plutôt que deux observations les jours (125, 160). En fait, la fonction coût a la même forme si l'on a des observations les jours (85, 125, 160) ou (85, 125). Il en est de même pour les configurations (125, 160) et (125). Donc une acquisition au jour 160 n'apporte pas d'information : la simulation passe quasiment par le même tracé, et donc par l'observation, quelle que soit la date de semis initiale (qu'elle soit précoce ou tardive).

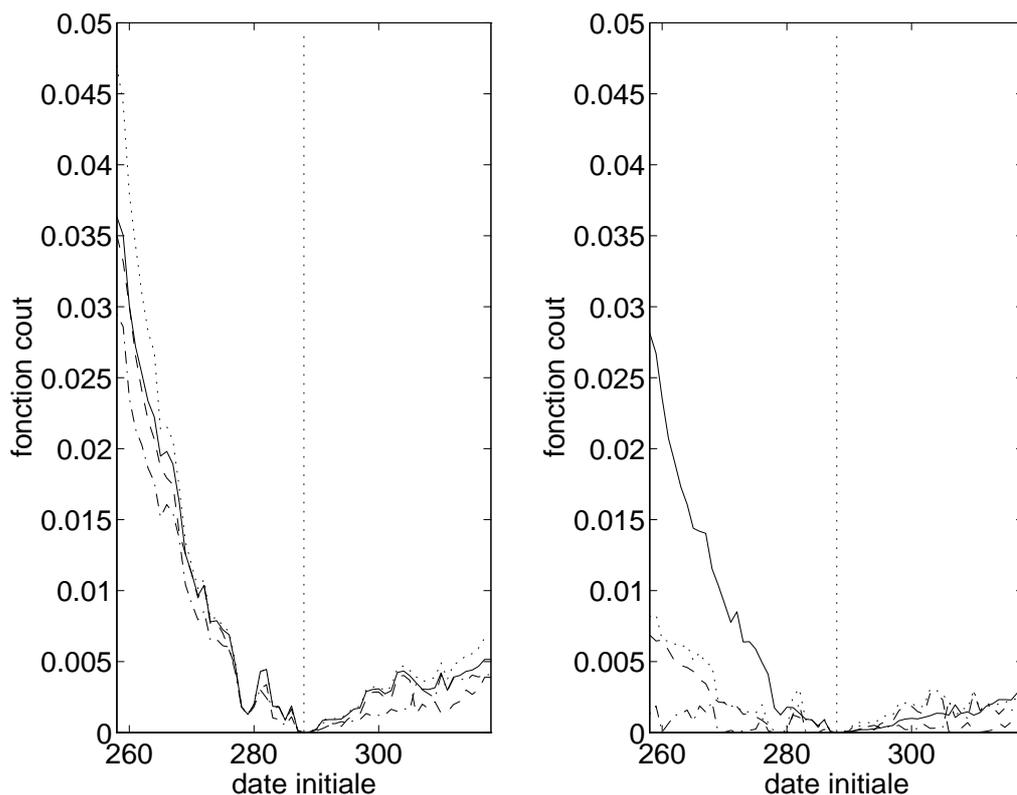


Figure IV-9 : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ((:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). Sur la figure a, (.), (-), (--) et (-.), sont les résultats obtenus avec les observations synthétiques reportées sur les Figures IV-8 a, b, c, et d. Sur la figure b, (.), (-), (--) et (-.), sont les résultats obtenus avec les observations synthétiques reportées sur les figures IV-8 e, f, g, et h. L'ajustement est effectué avec les réflectances visible et PIR.

Si l'on ne dispose que d'une observation, la meilleure période est la phase 2 (jj 85). Cependant avec une telle date, on détectera plus facilement une date de semis précoce que tardive, car la fonction coût ne remonte pas du côté des dates tardives (elle remonte davantage avec une acquisition à 125). Si l'on a deux observations, la meilleure configuration est une acquisition en période 2 (jj 85) et une acquisition en période 3 (jj 125). Les configurations favorables correspondent à des acquisitions pendant la phase de croissance.

Donc l'intérêt d'avoir 1, 2, 3, ou 4 observations dépend énormément de la position de ces observations. Ainsi la position des dates d'acquisition semble prévaloir sur leur nombre.

IV-3.5. Dates d'acquisition

Dans le but de déterminer les dates d'acquisition les plus pertinentes pour retrouver la date de semis de référence, on effectue des tests d'assimilation en utilisant successivement des dates d'acquisition du jj 70 au jj 180 avec un pas de temps de 10 jours. Les tests ont été effectués dans le cas de 1, 2, 3 ou 4 acquisitions.

Critère empirique de concavité

Lorsque l'on va augmenter le nombre d'acquisitions, le nombre de configurations va rapidement devenir très élevé. Il sera alors impossible de comparer visuellement les fonctions coût correspondant à chaque configuration. Si l'on observe le cas simple d'une acquisition, on note que la valeur maximale de la fonction coût est d'autant plus élevée que la courbure est marquée. Ceci n'est vrai que si la fonction coût a une allure parabolique. On peut considérer que c'est toujours le cas lorsque la valeur maximale de la fonction coût en fonction de la date initiale correspond à la fonction coût de la première ou de la seconde date initiale. On effectue alors un premier test pour repérer les fonctions coût n'ayant pas une allure parabolique (le maximum de la fonction coût n'est pas la fonction coût d'une des deux premières dates initiales). Ces points étant exclus (la fonction coût ne permet pas de

retrouver la date réelle), on trace les maximums des fonctions coût (appelé critère empirique de concavité) en fonction des n combinaisons possibles de dates d'acquisition, dans un ordre décroissant. Les fonctions coût n'étant pas symétriques, ce critère est seulement représentatif de la sensibilité aux dates plus précoces que la date de référence.

Cas d'une acquisition (12 configurations) : On note (fig. IV-10) que plus la date d'acquisition est tardive, moins la courbure de la fonction coût en fonction de la date de semis initiale est marquée. Le meilleur résultat (courbure la plus marquée) est obtenu avec une acquisition le jj 100. Les résultats obtenus avec une acquisition jj 90, 80 et 70 sont également satisfaisants. La figure IV-11 montre le critère empirique de concavité obtenu dans le cas d'1 acquisition. Les dates d'acquisition correspondantes sont reportées dans le tableau IV-3.

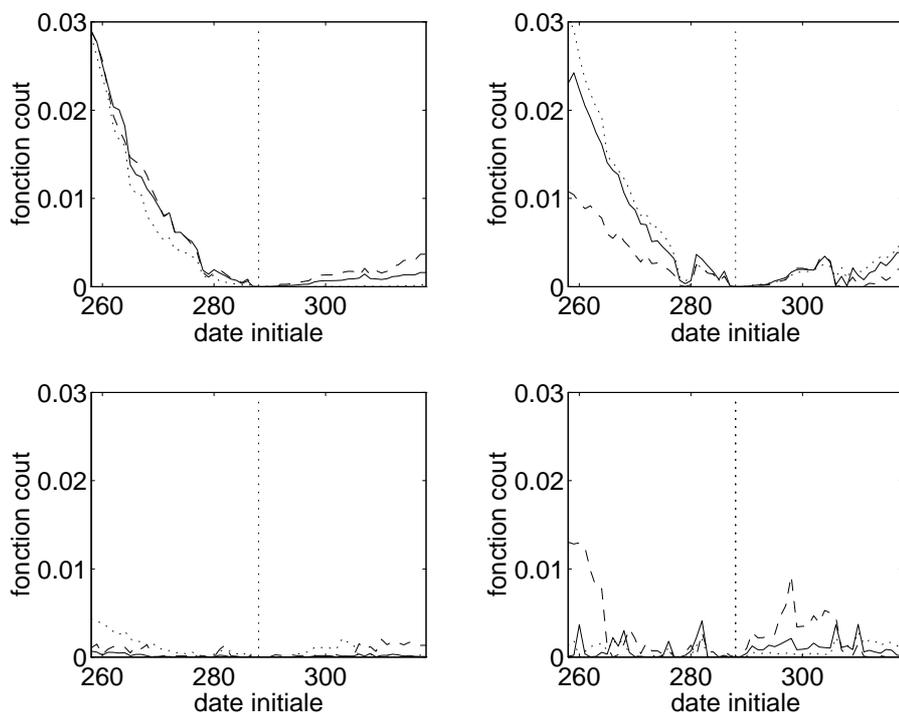


Figure IV-10 : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ((:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). La date d'acquisition (jj) de l'observation synthétique est (a) : 70 (..), 80 (-), 90 (--), (b) 100 (..), 110 (-), 120 (--), (c) 130 (..), 140 (-), 150 (--), (d) 160 (..), 170 (-), 180 (--). L'ajustement est effectué avec les réflectances visible et PIR, avec 1 acquisition.

(a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(b)	100	90	80	70	110	180	120	130	170	160	150	140

Tableau IV-3 : Classement des diverses dates d'acquisition en fonction du critère empirique de concavité de la fonction coût. Cas d'une acquisition.

(a): numéro de la combinaison

(b): date d'acquisition (jj).

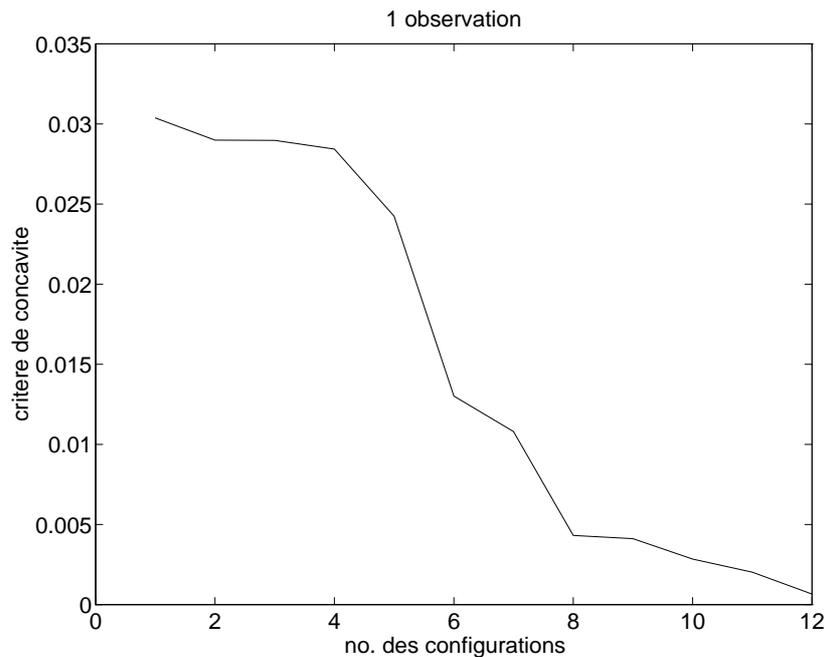


Figure IV-11 : Critère empirique de concavité de la fonction coût en fonction des diverses dates d'acquisition des observations synthétiques, par ordre décroissant du critère. Cas d'une acquisition. Les correspondances numéro de combinaison/dates d'acquisition sont reportées dans le tableau IV-3.

On note que pour ce cas simple, l'ordre obtenu par calcul du critère est cohérent avec les conclusions obtenues en visualisant la fonction coût (fig. IV-10).

Cas de deux acquisitions (66 configurations) : La figure IV-12 montre l'allure du critère de concavité en fonction des diverses combinaisons.

La meilleure configuration est le couple jj 70/80. De façon générale, les configurations intéressantes sont obtenues lorsque les deux acquisitions sont dans la période 2 (jj de 70 à 110), (début de la phase d'ascendance de la réflectance PIR), tableau IV-4.

Le plateau obtenu des configurations n°19 à n°39 correspond à des combinaisons où la première date se trouve en période 2, et la seconde en période 2 ou 3. Pour les dernières combinaisons (à partir du n° 40) aucune date d'acquisition n'est en période 1. Donc un couple d'acquisitions durant la période 2 conduit à une allure de la fonction coût qui permet de retrouver facilement la date de référence, à condition que les observations soient parfaites. Aucune information supplémentaire n'est apportée lorsqu'une acquisition est disponible le jj 180 (on se retrouve dans le cas d'une acquisition). Lorsque la première acquisition n'est disponible qu'à partir de la période 3, la dynamique de la fonction coût est trop faible, et ne permet pas de retrouver la date de référence.

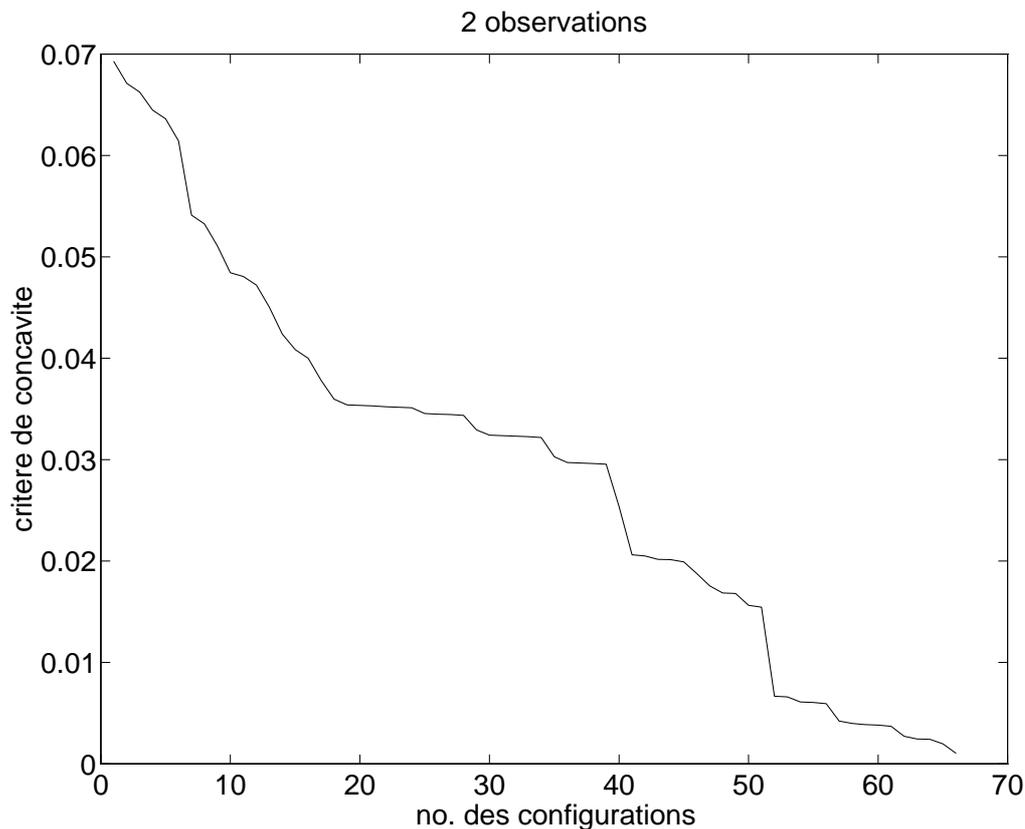


Figure IV-12 : Critère empirique de concavité de la fonction coût en fonction des numéros de combinaison des diverses dates d'acquisition des observations synthétiques, par ordre décroissant du critère. Cas de deux acquisitions. Les correspondances numéro de combinaison/dates d'acquisition pour les 10 premières combinaisons sont reportées dans le tableau IV-4.

(a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(b)	70	70	80	70	80	90	70	80	90	100
(c)	80	90	90	100	100	100	110	110	110	110

Tableau IV-4 : Classement des 10 premières combinaisons de dates d'acquisition en fonction du critère empirique de concavité de la fonction coût. Cas de 2 acquisitions.

(a) : numéro de la combinaison

(b) : date de la première acquisition (jj)

(c) : date de la seconde acquisition (jj)

Cas de trois acquisitions (220 configurations) : Le tracé du critère de concavité en fonction des diverses combinaisons (fig. IV-13) peut être découpé en grandes phases.

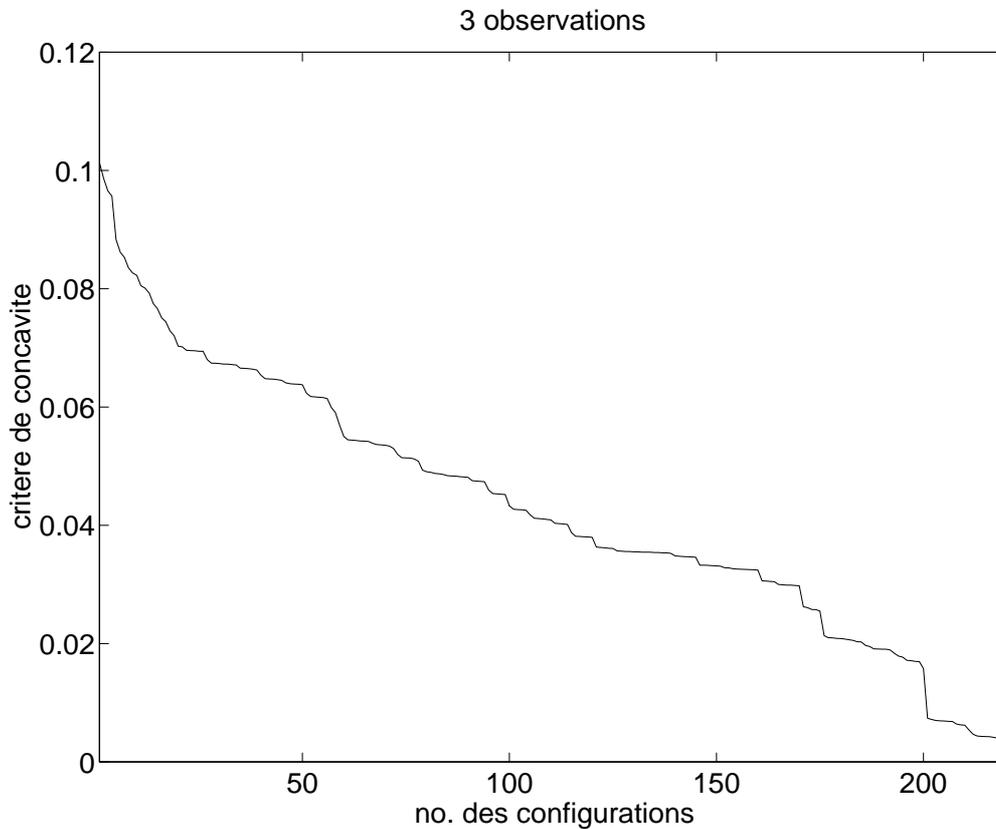


Figure IV-13 : Critère empirique de concavité de la fonction coût en fonction des numéros de combinaison des diverses dates d'acquisition des observations synthétiques, par ordre décroissant du critère. Cas de trois acquisitions. Les correspondances numéro de combinaison/dates d'acquisition pour les 10 premières combinaisons sont reportées dans le tableau IV-5.

Les meilleures combinaisons (tableau IV-5) sont celles qui correspondent à 3 acquisitions en période 2. Dans un ordre décroissant de qualité, viennent ensuite les configurations

correspondant essentiellement à des combinaisons comportant 2 acquisitions en période 2, puis les configurations où une seule acquisition est en période 2, enfin, les moins bonnes configurations sont obtenues pour des acquisitions exclusivement en période 2 et 3 avec en particulier de très mauvais résultats lorsque toutes les acquisitions sont proches du maximum de réflectance PIR.

(a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(b)	70	70	70	80	70	70	80	70	80	70
(c)	80	80	90	90	80	90	90	100	100	80
(d)	90	100	100	100	110	110	110	110	110	180

Tableau IV-5 : Classement des 10 premières combinaisons de dates d'acquisition en fonction du critère empirique de concavité de la fonction coût. Cas de trois acquisitions.

(a) : numéro de la combinaison

(b) : date de la première acquisition (jj)

(c) : date de la seconde acquisition (jj)

(d) : date de la troisième acquisition (jj)

Cas de quatre acquisitions (495 configurations) : Le tracé du critère de concavité en fonction des diverses combinaisons peut là encore être découpé en plusieurs phases. En augmentant le nombre d'observations, il devient clair que l'allure du critère est constituée de plateaux de pente décroissante avec des phases de transition très marquées entre chacun des plateaux (fig. IV-14).

A l'intérieur de chaque plateau, on distingue des sous-plateaux ayant des phases de transition moins prononcées. Les grands plateaux correspondent successivement (dans l'ordre des critères décroissants) aux cas où toutes les observations (4) sont acquises durant la période 2, puis seulement 3 des acquisitions, 2, 1 et enfin aucune d'entre elles. Les 10 meilleures configurations sont reportées dans le tableau IV-6.

Plus le nombre d'observations est grand, plus la concavité de la fonction coût est élevée.

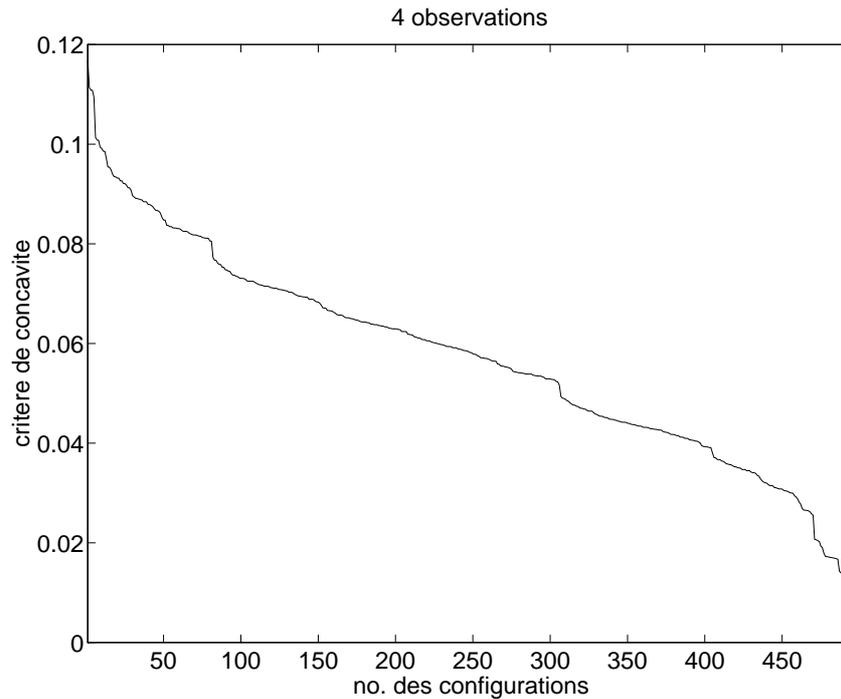


Figure IV-14 : Critère empirique de concavité de la fonction coût en fonction des numéros de combinaison des diverses dates d'acquisition des observations synthétiques, par ordre décroissant du critère. Cas de quatre acquisitions. Les correspondances numéro de combinaison/dates d'acquisition pour les 10 premières combinaisons sont reportées dans le tableau IV-6.

(a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(b)	70	80	70	70	70	80	70	70	70	80
(c)	80	90	90	80	80	90	90	80	80	90
(d)	90	100	100	100	90	100	100	100	90	100
(e)	100	110	110	110	110	180	180	180	180	120

Tableau IV-6 : Classement des 10 premières combinaisons de dates d'acquisition en fonction du critère empirique de concavité de la fonction coût. Cas de quatre acquisitions.

(a) : numéro de la combinaison

(b) : date de la première acquisition (jj)

(c) : date de la seconde acquisition (jj)

(d) : date de la troisième acquisition (jj)

(e) : date de la quatrième acquisition (jj)

IV-3.6. Précision sur les observations

Dans le cas d'une acquisition par phase, (4 acquisitions), on teste l'influence d'une différence d'amplitude entre l'observation et les réflectances simulées.

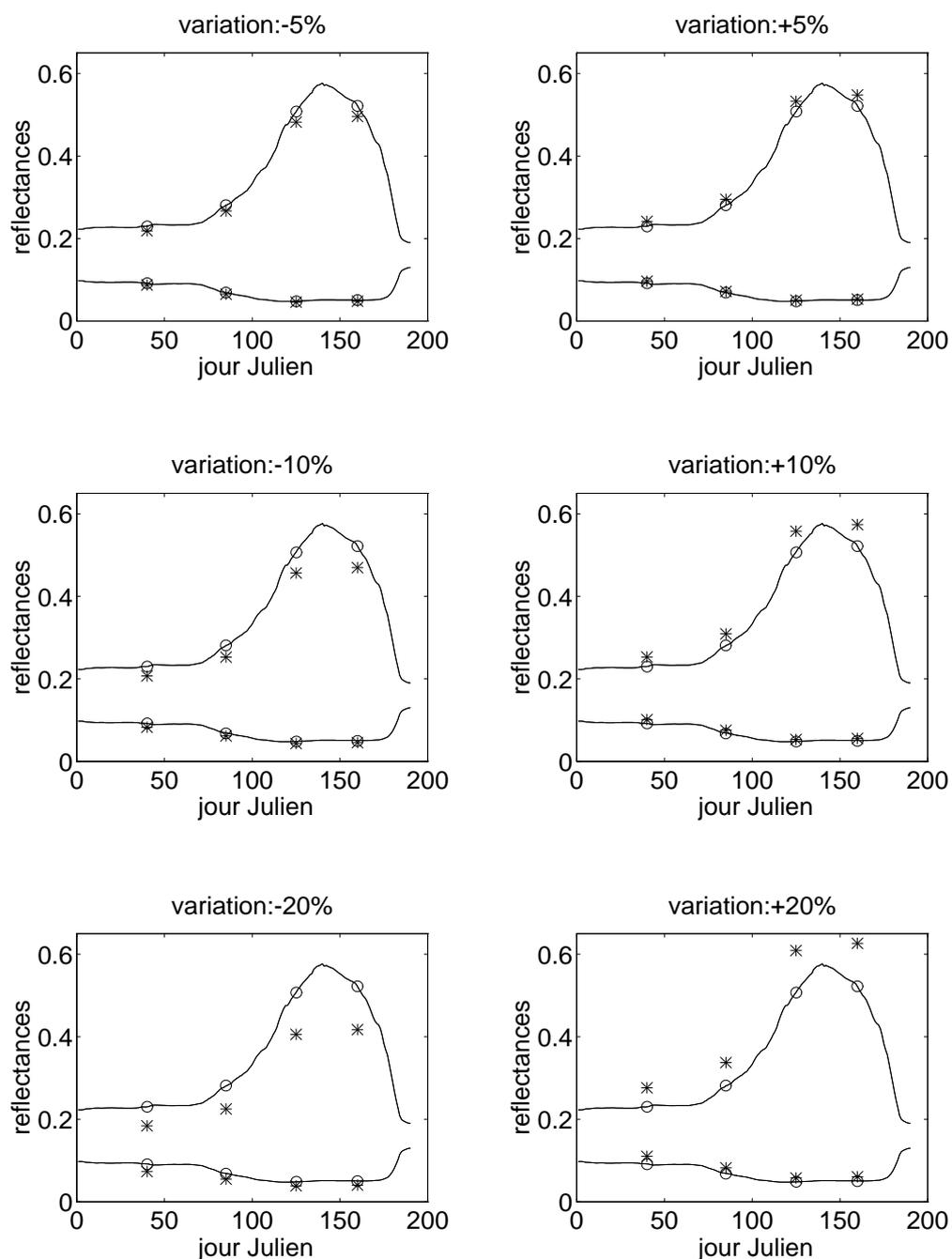


Figure IV-15 : Profils saisonniers de réflectances. Courbes supérieures pour le canal PIR, courbes inférieures pour le canal visible. (*) sont les observations avec une erreur de (a) -5%, (b) +5%, (c) -10%, (d) +10%, (e) -20%, et (f) +20% par rapport à la simulation de référence (o). Simulation de référence (-, o) obtenue avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAI, entrées : paramètres présentés dans le tableau II-3, condition de visée au nadir, variété Soissons, 1992.

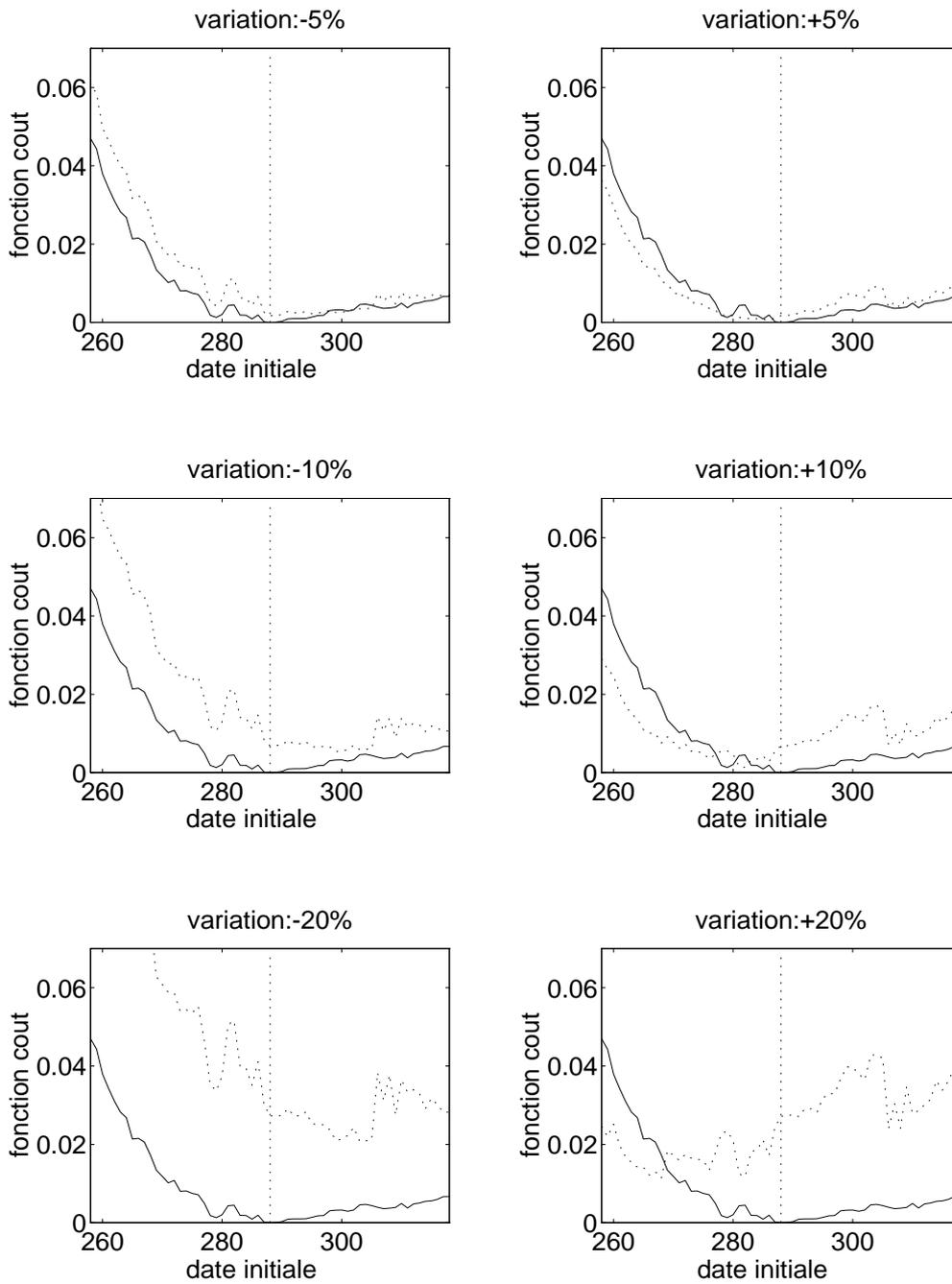


Figure IV-16 : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ((:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). Sur chaque figure, (-) est le résultat obtenu sans bruitage de l'observation. Sur les figures a, b, c, d, e, f (..) les résultats sont obtenus avec les observations synthétiques reportées sur les figures IV-15 a, b, c, d, et f. L'ajustement est effectué en utilisant les réflectances visible et PIR.

Nous avons constaté (Chapitre II), que si l'incertitude au niveau de certains paramètres d'entrée (contenu en vapeur d'eau et en aérosol) du modèle de corrections atmosphériques est importante, l'erreur sur l'estimation de la réflectance de surface est de l'ordre de 7% dans le PIR et 12% dans le visible. On effectue des tests d'assimilation en utilisant successivement des observations avec +/-5%, +/-10% et +/-20% d'erreur (fig. IV-15). Une erreur sur l'observation a un impact important sur le résultat de l'ajustement (fig. IV-16). Tout d'abord, lorsque les observations sont biaisées, la fonction coût ne s'annule jamais : aucune date de semis ne permet à la simulation d'être totalement conforme aux observations. Dans chaque cas, lorsque l'erreur sur les réflectances tend à augmenter leur valeur, la date de semis retrouvée est plus précoce que la date de semis de référence et inversement lorsque l'erreur sur les observations diminue leur valeur. Comme une date de semis estimée trop précoce a plus d'impact sur la production qu'une date de semis trop tardive (fig. IV-4), une erreur sur l'observation qui tendra à augmenter sa valeur engendrera une erreur plus grande sur l'estimation de la production que dans le cas contraire. Une erreur de +/-5% sur la réflectance n'engendre pas d'erreur sur la date retrouvée (tableau IV-7) ayant un impact significatif sur la production.

(a)	-5%	+5%	-10%	+10%	-20%	+20%
(b)	0	-2	+11	-6	+15	-20
(c)	0%	+4.8%	-1.3%	+12.4%	-1.8%	+20.3%
(d)	0%	+3.2%	-0.3%	+3.6%	-2.3%	+10%

Tableau IV-7 : Erreur sur la date de semis estimée après assimilation de 4 observations synthétiques biaisées. Résultats obtenus avec assimilation des réflectances visible et PIR.

(a) : erreur sur les observations

(b) : erreur, exprimée en nombre de jours, sur la date de semis retrouvée après ajustement par rapport à la date de référence.

(c) : erreur relative sur la NPP obtenue avec la date de semis retrouvée par rapport à celle obtenue avec la date de semis de référence.

(d) : erreur relative sur le rendement obtenu avec la date de semis retrouvée par rapport à celui obtenu avec la date de semis de référence.

Une erreur de +/-10% ou +/-20% n'a d'impact significatif sur la production que dans le cas d'une erreur relative positive (+10% ou +20%) sur l'observation et en particulier sur

l'estimation de la NPP. Les fonctions coût (qui peuvent être normalisées) donnent une indication concernant la précision requise pour les observations.

Un test d'assimilation identique à celui précédemment décrit a été effectué en assimilant des NDVI plutôt que des réflectances (fig. IV-17).

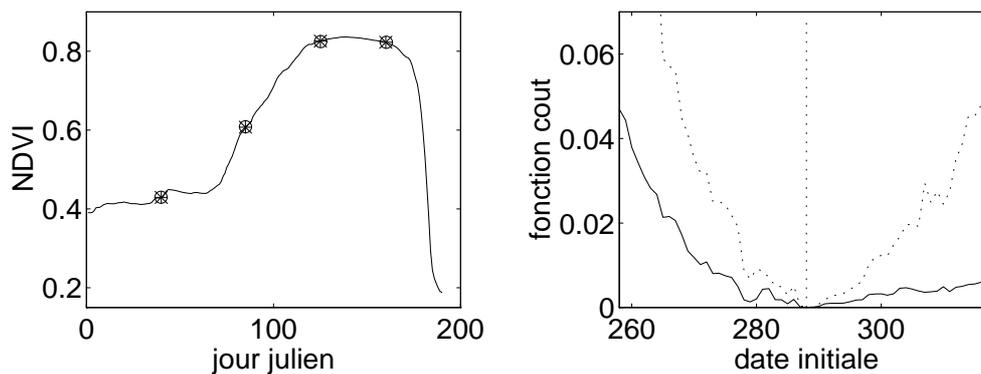


Figure IV-17 : (a) : Profil saisonnier de NDVI, (*) sont les observations synthétiques. Simulation de référence (-) obtenue avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL, entrées: paramètres résumés dans le tableau II-3, conditions de visée au nadir, variété Soissons, 1992.

(b) : Fonctions coût obtenues en fonction de la date de semis initiale utilisée (balayage de +/- 1 mois autour de la date de référence ((:), jj 288) avec un pas de temps quotidien). Résultats obtenus avec les observations synthétiques reportées sur la figure (a). L'ajustement est effectué avec les réflectances visible et PIR (-) ou avec le NDVI (..).

En fait, si l'on a la même erreur relative sur les réflectances visible et PIR (en valeur et en signe), ces erreurs s'annulent lorsque l'on calcule le NDVI. On note que la courbure de la fonction coût est plus marquée lorsque l'on assimile le NDVI plutôt que les réflectances (fig. IV-17b).

En toute rigueur, les variations de réflectances dues à l'atmosphère ne s'effectuent pas dans le même sens pour chacune des longueurs d'onde. A la surface, la réflectance PIR est plus élevée qu'au sommet de l'atmosphère, en revanche, la réflectance visible est plus faible.

IV-4. CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cas d'une assimilation effectuée avec des observations réelles (4 parcelles sur 2 années) montrent que des efforts concernant la simulation directe

(reproduction du signal radiométrique) doivent être faits dans le but d'obtenir un profil de réflectances simulées plus conforme aux observations, en particulier pour les acquisitions précoces. On montre tout de même l'exemple d'une parcelle pour laquelle l'ajustement obtenu avec 4 observations SPOT HRV (dont 3 très proches dans le temps) conduit à un résultat très satisfaisant.

Une étude de sensibilité a montré, que pour le modèle AFRCWHEAT, une variation vers une date de semis plus précoce a une plus grande influence sur le phasage des profils de réflectances, et sur la production (en particulier sur la NPP), qu'une date de semis vers une date tardive. L'incertitude sera donc plus importante pour les dates de semis tardives, ceci est compensé par le fait que d'après le modèle, on a également moins d'influence sur la production.

L'étude méthodologique effectuée avec des observations synthétiques sans erreur sur la mesure a permis de vérifier que plus on a d'acquisitions, plus la fonction coût est marquée. De façon générale, on ajuste avec moins de précision des dates de semis tardives que des dates de semis précoces, ceci s'explique par la dissymétrie de la fonction coût qui elle-même est due à une réponse plus sensible du modèle de culture à une variation de dates de semis lorsque celle-ci est précoce. Pour ce qui est de l'échantillonnage temporel, une amélioration est obtenue lorsque la fréquence temporelle passe de 20 à 10 jours, en revanche, au delà d'une fréquence d'acquisition de 20 jours, l'amélioration n'est pas significative. Les tests effectués avec 1, 2, 3 ou 4 observations sont intéressants car, dans un cas réel, on a effectivement très peu d'images SPOT HRV par saison végétative pour contraindre la modélisation. Il s'avère que le résultat dépend fortement de la position de ces observations. C'est donc davantage la position des observations qui détermine leur "efficacité" en terme d'ajustement de la date de semis, que leur nombre. Les tests effectués en balayant toutes les dates d'acquisition possibles (avec un pas de 10 jours) avec 1, 2, 3 ou 4 observations montrent que, quel que soit leur nombre, les acquisitions apportent plus en terme de qualité de l'ajustement si elles correspondent à la phase 2 du cycle (début de l'accroissement du signal PIR). Dans le cas particulier de ce profil de référence, le jj 110 semble être une date charnière au delà de laquelle une acquisition présente moins d'intérêt

pour l'ajustement. Les acquisitions apportant le moins d'information sont celles se trouvant à la fin de la sénescence, ou à proximité du maximum du signal PIR.

Dans tous les cas, la concavité de la fonction coût n'étant pas extrêmement marquée, il est important de savoir quelle sera l'erreur engendrée par une erreur sur l'observation sur l'ajustement de la date de semis, ainsi que l'impact sur l'estimation de la production. Une erreur sur l'observation permet plus difficilement de retrouver la date de semis de référence lorsque l'erreur surestime l'observation. Une erreur sur l'observation conduit à une erreur sur l'estimation de la production plus importante pour la NPP que pour le rendement. Des erreurs de +/-10% et +/-20% sur l'observation ont un impact significatif sur l'estimation de la production, en particulier sur la NPP. On note enfin que si l'on assimile un NDVI plutôt que des réflectances, le minimum de la fonction coût est plus marqué.

Au cours de ce Chapitre, nous avons constaté que les observations haute résolution spatiale ne sont disponibles que pour quelques dates au cours du cycle saisonnier, nous allons au cours du Chapitre suivant aborder la simulation du signal radiométrique basse résolution spatiale disponible quotidiennement.

CHAPITRE V

VERS L'ECHELLE REGIONALE - HAUTE ET BASSE RESOLUTIONS SPATIALES

V-1. INTRODUCTION

La faible fréquence temporelle des données haute résolution spatiale nous incite à utiliser des observations basse résolution spatiale qui sont, elles, disponibles quotidiennement. Le signal acquis pour un pixel NOAA AVHRR résulte de la contribution de divers types de végétation. Il faut donc avant tout s'assurer que ce signal peut être interprété.

Dans un premier temps, on simule le profil régional (40 km x 40 km) du signal radiométrique du blé d'hiver, pour 1991 et 1992 que l'on compare aux observations SPOT HRV moyennées sur toutes les parcelles de blé d'hiver de la région.

On s'assure ensuite de la cohérence des observations SPOT HRV et NOAA AVHRR dégradées à l'échelle régionale.

Enfin, une modélisation du signal radiométrique basse résolution NOAA AVHRR sur un paysage agricole hétérogène est effectué sur des bases biologiques, un modèle de croissance étant utilisé pour les 2 cultures prépondérantes de la région considérée, pour l'année 1992.

La question essentiellement soulevée au cours de ce Chapitre est la suivante : *Peut-on prévoir des réflectances satellitaires basse résolution spatiale par le couplage d'un modèle de fonctionnement et d'un modèle de transfert radiatif dans le couvert (Moulin et al., 1995)?*

V-2. VARIATIONS INTER-ANNUELLES DU SIGNAL RADIOMETRIQUE DES PARCELLES DE BLE (SPOT HRV)

Les réflectances sont prédites pour deux années successives pour l'ensemble des parcelles de blé d'hiver de la région. On simule les profils temporels des réflectances et NDVI de blé d'hiver d'après la description faite dans le Chapitre I, en supposant que les dates de semis et les variétés des parcelles enquêtées soient représentatives à l'échelle régionale. Pour chaque combinaison de date de semis/caractéristiques variétales et pour une année donnée, on a simulé les profils temporels de réflectances en utilisant les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL (conditions de visée au nadir). Après pondération des réflectances

en fonction des surfaces correspondantes, on obtient des profils temporels de réflectances et de NDVI représentatifs de tous les champs de blé de la région.

Pour chaque date d'acquisition, on moyenne les mesures SPOT HRV correspondant aux pixels des parcelles de blé d'hiver, d'après la classification de l'année considérée. Les pixels correspondant aux bordures des parcelles sont exclus. On compare alors les simulations régionales effectuées au Nadir avec les observations SPOT "des parcelles de blé à l'échelle régionale" (figs. V-1 et V-2).

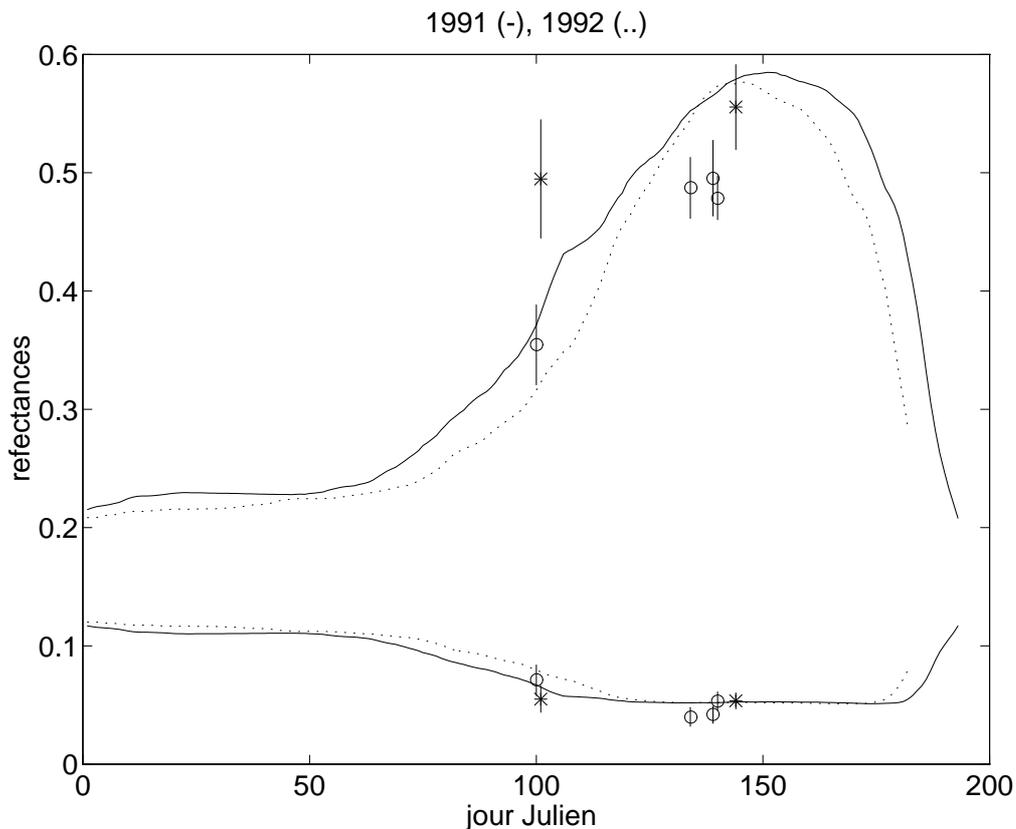


Figure V-1 : Profils temporels de réflectances observées, (*) en 1991 et (o) en 1992, et modélisées, (-) en 1991 et (..) en 1992, l'échelle régionale. La simulation est une combinaison des réflectances obtenues pour chaque date de semis/variété des parcelles enquêtées, pondérées par leur surface relative. Les observations SPOT (+/- 1 écart-type) sont des moyennes effectuées sur l'ensemble des parcelles de blé d'hiver de la région (40 km x 40 km). Courbes supérieures pour le canal PIR et courbes inférieures pour le canal visible. Simulations obtenues avec les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL.

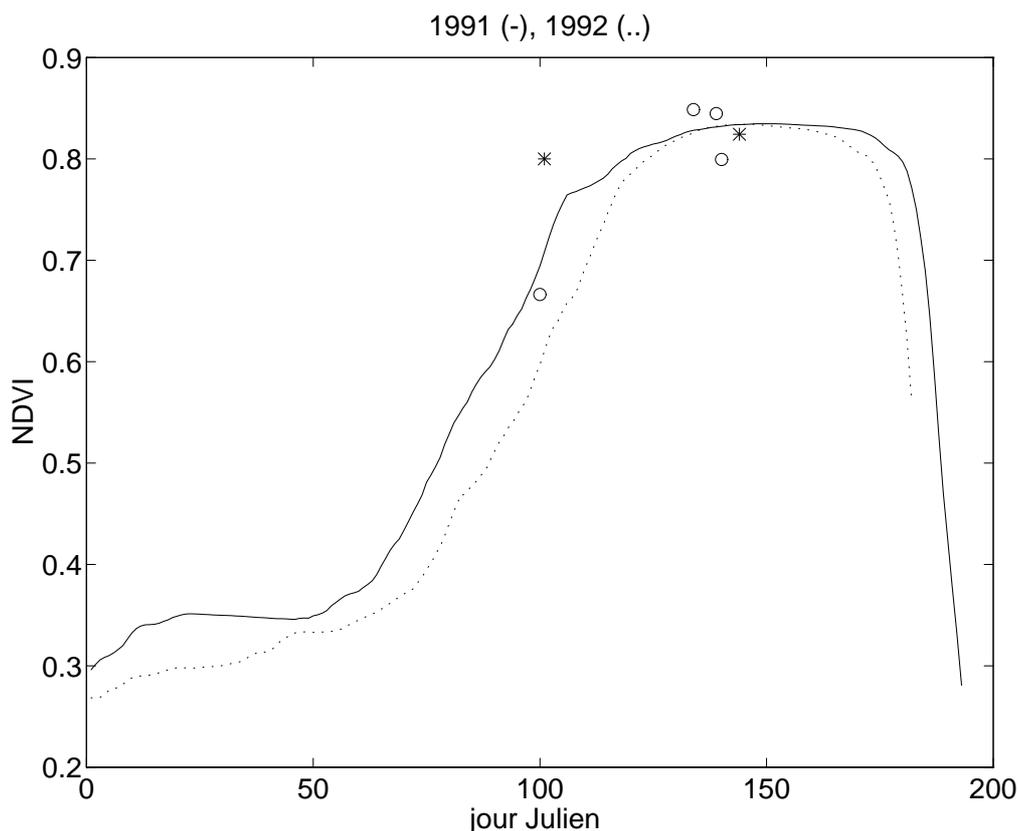


Figure V-2 : Profils temporels de NDVI observés, (*) en 1991 et (o) en 1992, et modélisés, (-) en 1991 et (..) en 1992, à l'échelle régionale, en utilisant la même procédure que pour la figure V-1.

Pour une année donnée, la différence entre la simulation PIR au nadir et les observations en mai peut en partie être expliquée par le fait que les angles de visée de SPOT ne sont pas pris en compte dans la simulation régionale. En effet, les simulations ont été effectuées dans des conditions de visée au nadir. Les acquisitions étant seulement disponibles pour quelques dates, les simulations correspondantes (2 pour 1991 et 4 pour 1992) ne permettent pas de reproduire un cycle. Si l'on se réfère à l'étude inter-annuelle effectuée sur 4 parcelles (fig. III-6), on note que dans le PIR, les valeurs des simulations au nadir sont supérieures aux valeurs des simulations directionnelles cohérentes avec les observations SPOT. Cette différence est atténuée sur les profils de NDVI (fig. V-2).

Le décalage simulation/observation observé à l'échelle régionale dans le PIR en mai est donc cohérent. Ici encore, on se heurte au problème rencontré à l'échelle de la parcelle pour la simulation PIR en avril, vraisemblablement dû à une mauvaise paramétrisation des

propriétés optiques du sol ou à une sous-estimation du développement du couvert tel qu'il est modélisé par le modèle de fonctionnement.

Malgré l'hypothèse effectuée concernant la représentativité (en terme de date de semis et de variété) sur les parcelles enquêtées à l'échelle régionale, on note que le décalage inter-annuel (de 1991 à 1992) des profils temporels de réflectances/NDVI simulés est en accord avec le décalage inter-annuel des mesures SPOT entre 1991 et 1992. De plus, le décalage est cohérent avec celui observé à l'échelle de la parcelle (figs. III-6 et III-7) : aussi bien à l'échelle de la parcelle, que régionale, les profils temporels de réflectances/NDVI en 1991 précèdent ceux de 1992.

V-3. CONFRONTATION DES DONNEES SATELLITAIRES SPOT ET NOAA

Les données SPOT HRV et NOAA AVHRR sont acquises avec des angles de visée et solaires différents. Les bandes passantes des canaux des capteurs diffèrent également (tableaux I-1 et I-2). Dans le PIR, le canal HRV est contenu dans le canal AVHRR, mais dans le visible les bandes spectrales sont décalées. Enfin, l'étalonnage et les corrections atmosphériques ne sont pas effectuées de la même façon. La principale différence concerne l'effet des aérosols qui n'a pas été pris en compte pour la correction des données AVHRR. Il est donc intéressant de confronter les réflectances observées provenant de ces 2 capteurs. Bien entendu, comme les mesures HRV sont seulement disponibles pour 5 dates en 1992, la comparaison est limitée à ces jours-là.

On a calculé les réflectances moyennées sur la zone d'étude pour les acquisitions des 2 capteurs. Pour un jour donné, il y a 14 pixels (au maximum à cause de l'enneigement) moyennés pour AVHRR (4 km par 4 km), alors qu'il y a 550000 pixels pour HRV (20 m par 20 m). Les réflectances observées sont représentées sur la figure V-3, pendant la période de croissance des céréales d'hiver.

Dans le visible, bien que les allures temporelles générales soient proches pour les 2 capteurs, les réflectances SPOT sont toujours plus faibles que celles de NOAA quelles que soient les conditions d'acquisition. On peut expliquer cette différence par le fait qu'une correction des effets dus aux aérosols est seulement effectuée pour les observations SPOT.

Cette correction diminue par exemple la réflectance visible du 18 mai 1992 de 23% (tableau II-10). Les résultats sont en meilleur accord dans le canal PIR.

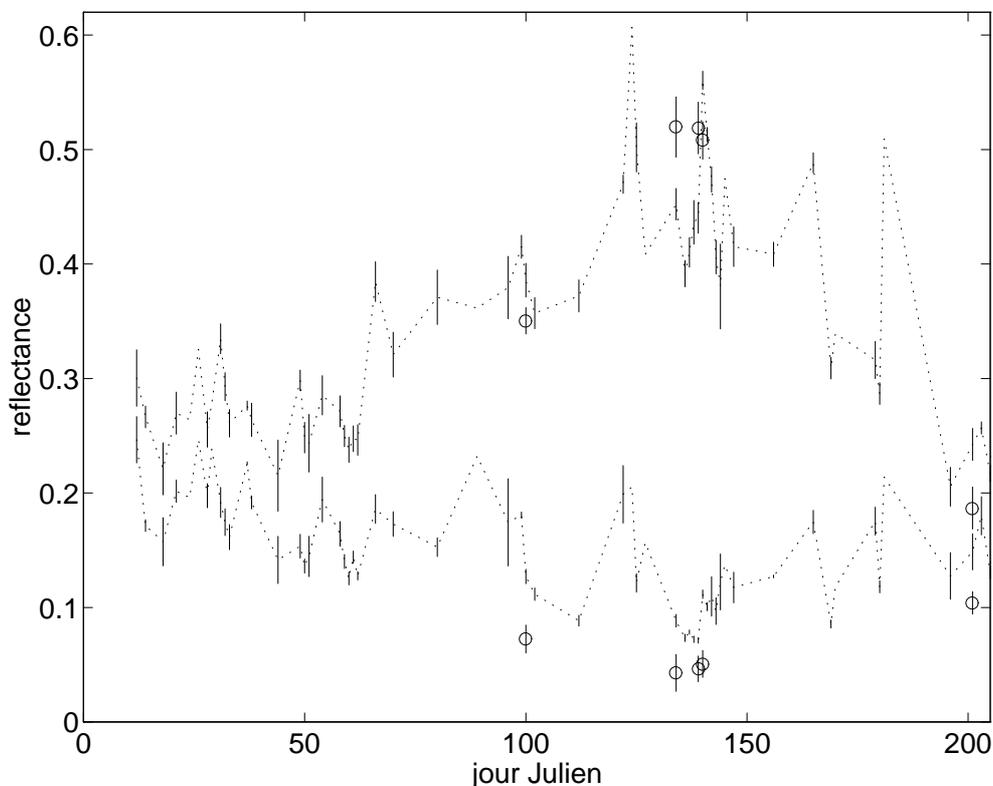


Figure V-3 : Profils temporels de réflectances observées NOAA AVHRR (..) sur la partie sud du site d'étude (11 km x 20 km) dans le canal PIR (courbe supérieure) et le canal visible (courbe inférieure), +/- 1 écart-type pour chaque valeur observée. Lorsqu'une seule mesure est disponible (c'est à dire un pixel en ciel clair parmi 14), pour un jour donné, l'écart-type n'est pas représenté. Les observations SPOT HRV (o) correspondent au canal PIR (points supérieurs) et au canal visible (points inférieurs).

Si on considère les 18 et 19 mai, on suppose que le couvert n'a pas changé d'un jour à l'autre. Toutefois, bien que les mesures SPOT soient proches les unes des autres, on note une grande différence concernant les valeurs des réflectances NOAA. L'angle de vue varie de 25° pour HRV, alors que la variation est de 45° pour AVHRR (tableau II-1). Bien que la résolution spatiale d'AVHRR soit plus faible que celle d'HRV, les réflectances données par les 2 capteurs sont compatibles si l'on considère les différences des angles solaires et de visée.

V-4. COMPARAISON ENTRE LES REFLECTANCES AVHRR SIMULEES ET OBSERVEES

V-4.1. Recomposition du signal régional-Comparaison avec les données basse résolution

démarche (voir figure I-10)

Les modèles ne sont pas disponibles pour chaque type de végétation. Pour les 11 classes qui représentent 35% de la surface, les profils temporels de réflectances ont été estimés en utilisant deux types d'information : premièrement, les mesures radiométriques terrain pour les années 1983 et 1984 pour chaque classe représentée sur la surface (SCEES, 1985), et, deuxièmement, la classification d'occupation du sol utilisée pour moyenniser les réflectances SPOT observées sur chacune des 11 classes pour les 5 dates disponibles. Ce processus est utilisé pour les cultures d'été mais aussi pour les classes de jachère, forêt et ville. Ainsi nous sommes en mesure d'estimer les profils temporels de réflectances de chaque classe. La figure V-4 montre comment la méthode a été appliquée à la classe des pois.

Pour ce qui est des 2 principales classes, orge d'hiver et blé d'hiver, qui représentent 65% de la surface totale, les profils temporels de LAI ont été simulés par le modèle AFRCWHEAT2. Comme nous ne disposons pas de modèle pour l'orge d'hiver, nous faisons l'hypothèse que cette plante a un comportement proche de celui du blé pour sa croissance et sa phénologie. L'orge mûrit environ 15 jours avant le blé (SCEES, 1985), donc la décroissance du LAI vert en fonction du temps a été avancée de 15 jours. Les 16 sites-test correspondent à 1% de la surface étudiée. On suppose donc que les caractéristiques (date de semis et variété) des parcelles de blé des sites-test, sont représentatifs de la surface totale. Pour l'étude à l'échelle régionale, l'indice foliaire modélisé est calculé avec ces paramètres d'entrée. Puis, le modèle SAIL prédit des réflectances en utilisant les angles de visée et solaires quotidiens d'AVHRR.

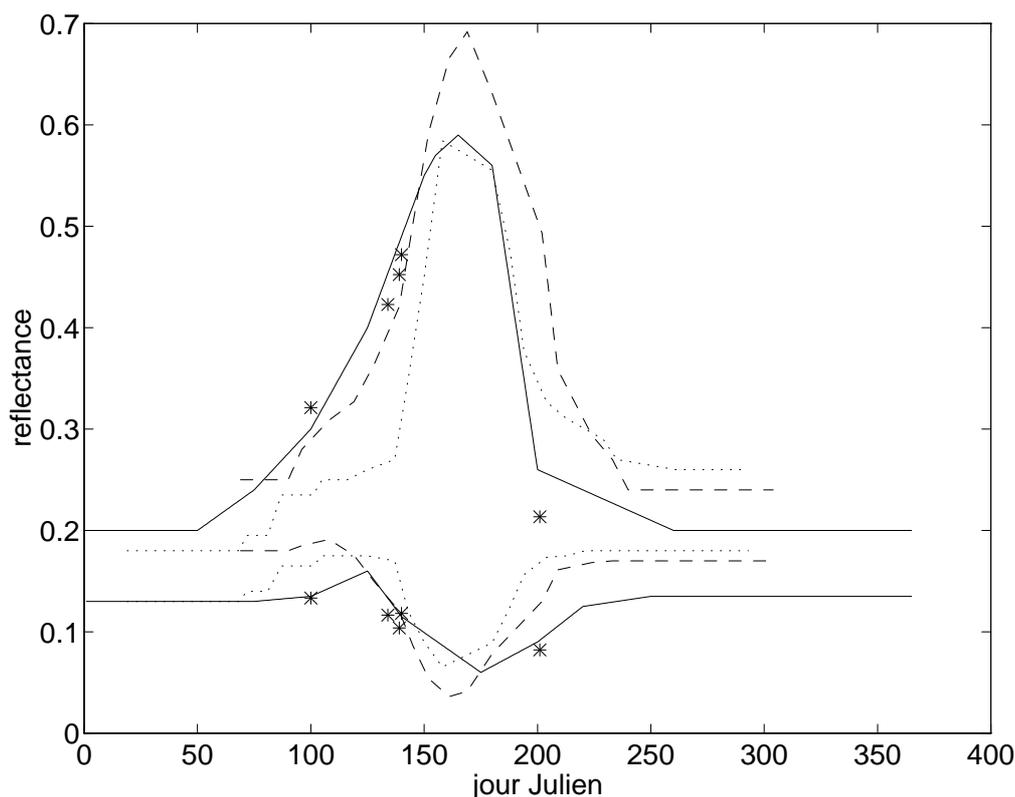


Figure V-4 : Profils temporels des réflectances du pois (à partir du 1er janvier). Courbes et points supérieurs pour le canal PIR et courbes et points inférieurs pour le canal visible. Mesures terrain : (..) 1983, (--) 1984; Observations SPOT 1992 (*). (-) correspond aux profils utilisés pour la simulation du signal radiométrique à l'échelle régionale.

Enfin, la classification d'occupation du sol est utilisée pour pondérer chaque réflectance de classe avec leur pourcentage relatif [Eq. (I-1)]. La simulation au niveau de la région est alors effectuée, en utilisant les résultats du modèle pour les céréales d'hiver, et les valeurs estimées pour les classes les plus faiblement représentées (fig. I-10).

résultats

Les comparaisons ont été effectuées pour 14 pixels AVHRR de la région d'étude. Environ 40 jours d'acquisition sont disponibles pour ces pixels au cours de la période allant de janvier à octobre 1992. Bien entendu, les jours de ciel clair ne sont pas les mêmes pour tous les pixels. Les valeurs obtenues pour les 14 pixels sont très proches les unes des autres, ceci confirme l'hypothèse d'homogénéité de cette région. Pour chaque jour, les observations tracées sont des réflectances moyennées sur les pixels sélectionnés.

Tout d'abord, nous avons tracé les réflectances modélisées en fonction des réflectances observées. Les résultats obtenus dans le canal PIR pendant la période de croissance des cultures pour les jours de ciel clair sont montrés sur la figure V-5.

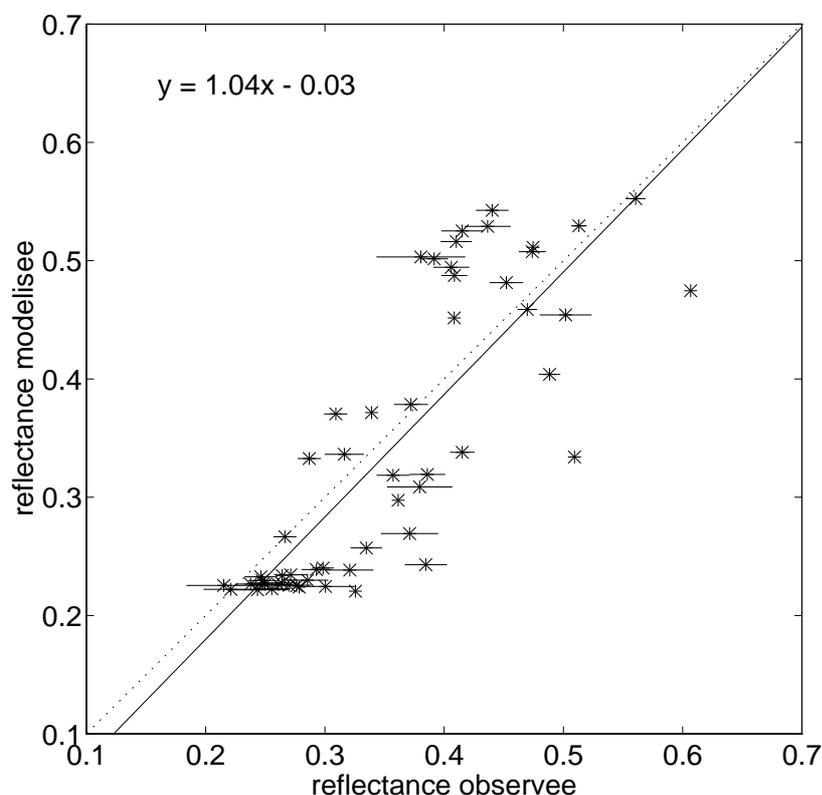


Figure V-5 : Réflectances dans le canal PIR modélisées (y) en fonction des réflectances moyennes observées (x) pour 14 pixels AVHRR de la zone d'étude (11 km x 20 km) pour chaque jour d'acquisition. (-) est la droite de régression et (..) est la première bissectrice (droite 1:1). Simulations obtenues en considérant la fraction de surface de chaque classe de végétation représentée sur le site d'étude, et sa réflectance simulée dans le canal PIR : AFRCWHEAT2 est utilisé pour les céréales d'hiver et des valeurs empiriques pour les composantes minoritaires. Pour chaque valeur observée, la barre horizontale a pour longueur 2 fois l'écart-type sauf lorsque une seule mesure est disponible pour un jour donné (1 pixel en ciel clair parmi 14).

Pour les 14 pixels de cette zone, les réflectances PIR simulées et observées s'accordent raisonnablement bien [le coefficient de corrélation est 0.82 et l'erreur quadratique moyenne (rmse) est 0.069]. Ce résultat est satisfaisant si l'on se souvient que plus de 10 catégories de végétation sont mélangées sur cette surface.

Deuxièmement, on compare les profils temporels des réflectances et des indices de végétation NDVI simulés et observés (figs. V-6 et V-7).

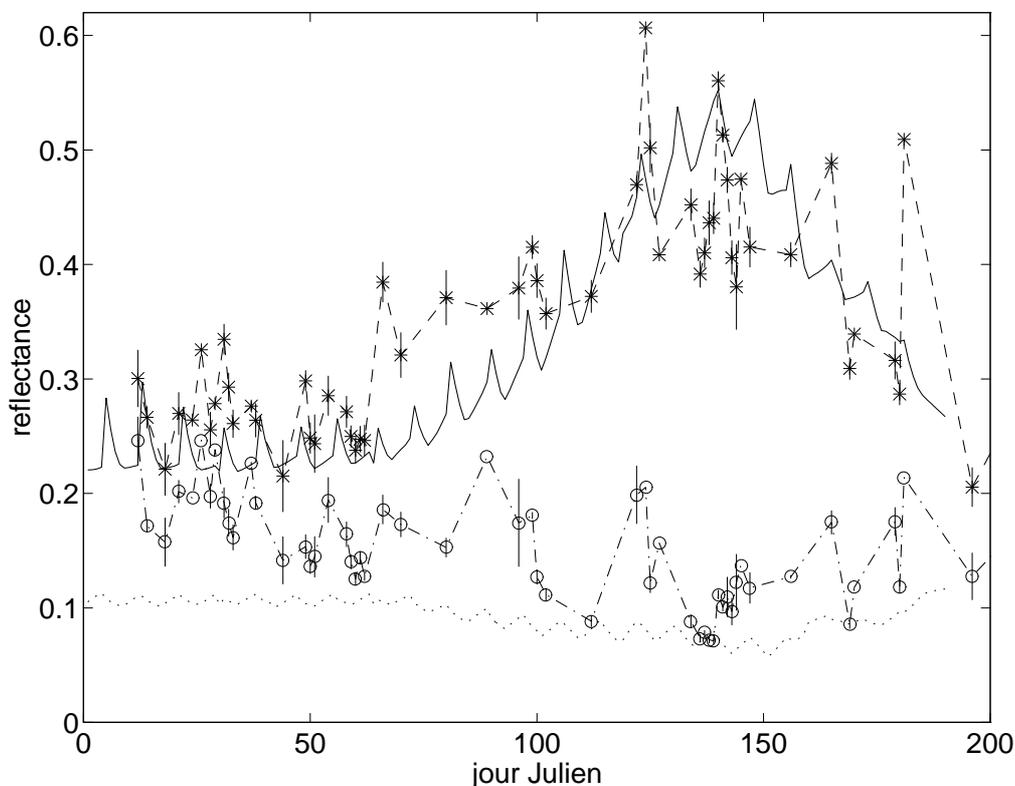


Figure V-6 : Profils temporels de réflectances observées (AVHRR) et modélisées à l'échelle régionale: Simulation dans le canal visible (..) et dans le canal PIR (-). Observations (moyenne) dans le visible (o) et dans le PIR (*) pour 14 pixels de la zone d'étude (11 km x 20 km). Simulations obtenues en considérant la fraction de surface de chaque classe de végétation représentée sur le site d'étude, et sa réflectance simulée dans le canal PIR: AFRCWHEAT2 est utilisé pour les céréales d'hiver et des valeurs empiriques pour les composantes minoritaires. Observations NOAA/AVHRR (moyenne pour 14 pixels) +/- 1 écart-type sauf lorsqu'une seule mesure est disponible pour un jour donné.

Les réflectances simulées ont été calculées en utilisant les angles de visée et solaire appropriés. On constate (figs. V-6 et V-7) l'effet des angles d'acquisition AVHRR, et en particulier le cycle répétitif orbital de 10 jours.

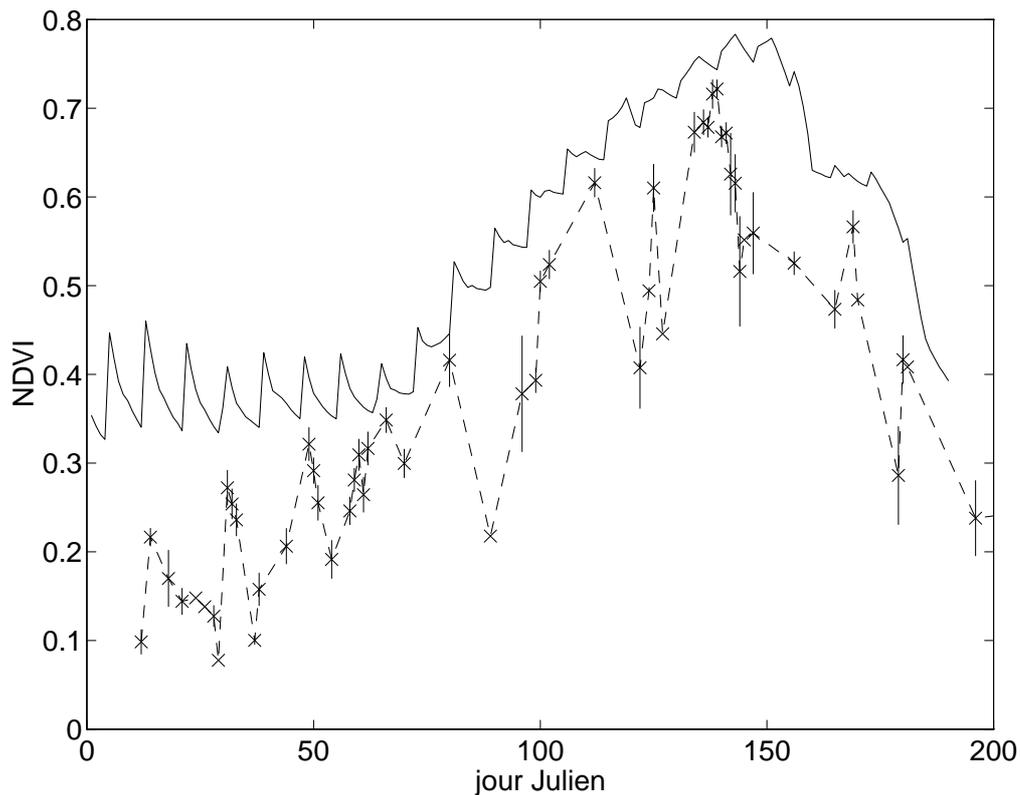


Figure V-7 : Profil temporel de NDVI observés (x) et modélisés (-) pour AVHRR à l'échelle régionale en utilisant la même procédure que pour la figure V-6.

Le profil temporel de NDVI est calculé à partir des profils temporels des réflectances visible et PIR. Les effets directionnels sont en partie atténués pour le NDVI.

Le comportement général est cohérent : le maximum dans le PIR et le minimum dans le visible en mai correspondent à une région où les cultures d'hiver sont prédominantes. Afin de comparer ces observations avec une simulation à un pas de temps quotidien, on utilise le NDVI qui a une grande dynamique. La figure V-7 montre que, bien que les valeurs observées soient systématiquement inférieures aux valeurs simulées, les allures des courbes sont assez similaires. Au début de la période de croissance, la simulation aurait été plus faible si la couverture fractionnaire avait été considérée.

V-4.2. Impact du taux de couvert sur les réflectances simulées

La simulation à l'échelle régionale a été obtenue par la combinaison de profils empiriques de réflectance (pour les classes faiblement représentées) et de profils de réflectances

modélisées (pour les céréales d'hiver) comme décrit sur la figure I-10. La couverture fractionnaire (fig. V-8) est incluse dans la simulation des réflectances du blé et de l'orge prédites par le modèle de transfert radiatif. Le profil temporel de la couverture fractionnaire est obtenu par relevé terrain (SCEES, 1985) dans des conditions climatiques et de phasage temporel similaires à celles du site d'étude en 1992.

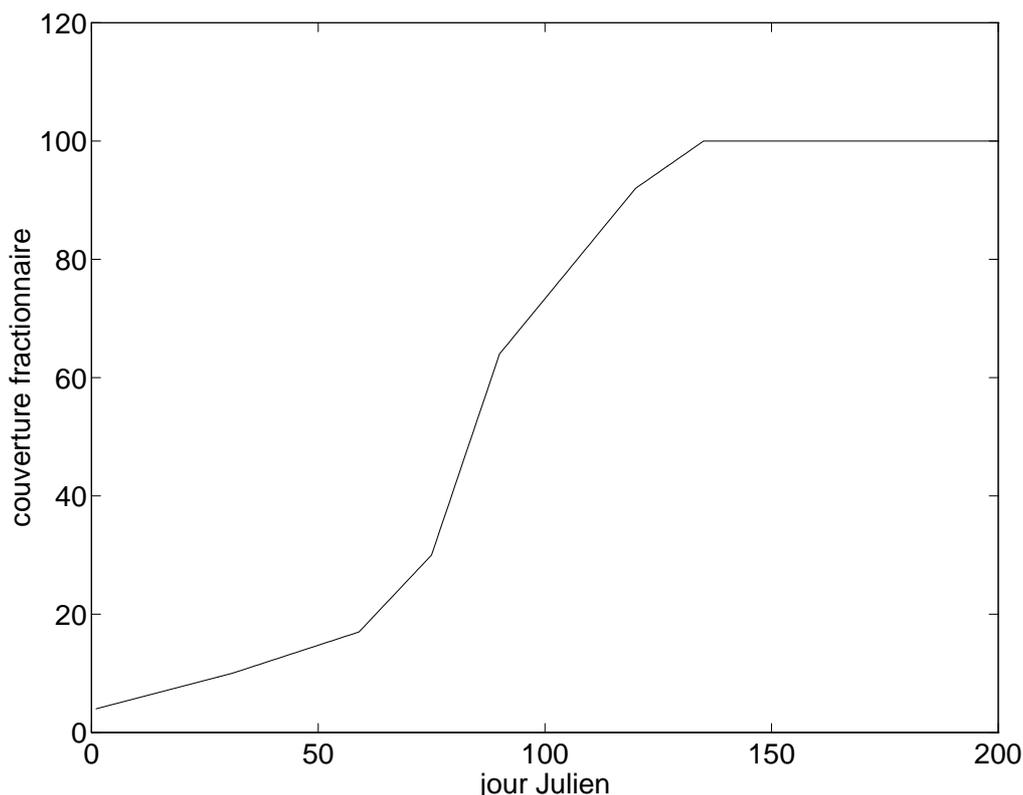


Figure V-8 : Profil temporel de la couverture fractionnaire de la végétation pour les céréales d'hiver (SCEES, 1985). Site Beauce 1983.

Prise en compte de la couverture fractionnaire de la végétation

Dans l'étude à l'échelle régionale, pour le blé et pour l'orge, qui ont un développement de couvert similaire, le LAI (\bar{L}) donné par le modèle de culture a été corrigé avec la couverture fractionnaire (Sellers *et al.*, 1986), comme suit :

$$L = \bar{L} / \tau \quad (\text{équation V-1})$$

L : indice foliaire local, \bar{L} : indice foliaire équivalent sur la surface, et τ : couverture fractionnaire de la végétation

Puis, pour chaque bande de longueur d'onde, on calcule la réflectance composite quotidienne.

Major *et al* (1992) ont comparé diverses méthodes permettant de prendre en compte la couverture fractionnaire dans la simulation des réflectances. Dans notre cas, comme il n'y avait pas d'amélioration appréciable lorsque les ombres causées par les rangs et la hauteur du couvert étaient pris en compte, et aux vues des difficultés pour obtenir des mesures de terrain pour ces caractéristiques, nous n'avons pas pris en compte ces effets dans la modélisation des réflectances. On suppose que les effets d'ombre et d'adjacence sont négligeables. La réflectance composite du couvert végétal est alors exprimée comme suit :

$$R' = \tau R + (1 - \tau) R_{soil} \quad (\text{équation V - 2})$$

R : réflectance du couvert, couverture fractionnaire non prise en compte; R' : réflectance du couvert, couverture fractionnaire prise en compte; τ : couverture fractionnaire;

R_{soil} : réflectance du sol (supposé lambertien).

Ces nouvelles réflectances sont utilisées pour simuler le signal radiométrique à une échelle régionale. La comparaison entre les observations et la simulation recalculée est présentée sur la figure V-9.

Si l'on compare ces courbes de NDVI avec celles de la figure V-7, on note que la simulation est plus proche des observations si l'on tient compte de la couverture fractionnaire. L'augmentation des signaux observés et modélisés apparaît environ à la même période. Au début de l'année, quand la contribution de la réflectance provenant des feuilles est faible, les effets directionnels sont atténués comme nous faisons l'hypothèse d'un sol lambertien. La simulation du début du développement du couvert est améliorée par la prise en compte de ce facteur à une échelle régionale.

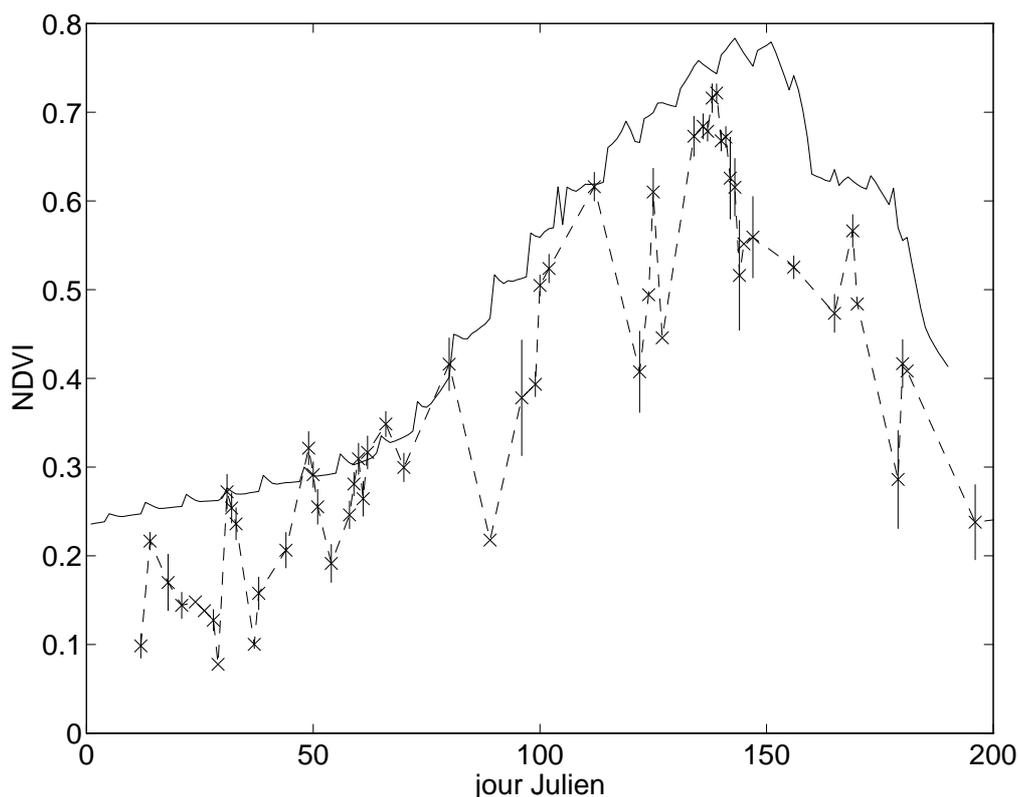


Figure V-9 : Profils temporels de NDVI observés (x) et modélisés (-) pour AVHRR. Procédure identique à celle utilisée pour la figure V-7, excepté que la couverture fractionnaire est prise en compte pour la simulation des réflectances des céréales d'hiver.

Le profil de NDVI simulé a été obtenu en utilisant un modèle mécaniste pour les céréales d'hiver, des profils empiriques pour les autres types de végétation, une carte d'occupation du sol, un profil temporel de couverture fractionnaire de la végétation, et un modèle de transfert radiatif. L'erreur résultante est difficile à évaluer. Comme les céréales d'hiver représentent une part prédominante de l'occupation du sol du site d'étude, la modélisation à l'échelle régionale prend en compte la croissance et le développement du blé et de l'orge de façon détaillée, au moyen du modèle AFRCWHEAT2.

V-5. CONCLUSION

simulation du signal radiométrique "blé d'hiver" à l'échelle de la région

Pour une année donnée, la reconstitution des profils de réflectances des parcelles de blé de l'ensemble de la région, en utilisant la distribution date de semis/Psat-Vsat des parcelles enquêtées reproduit grossièrement les observations SPOT HRV moyennées sur l'ensemble

des parcelles de blé d'hiver de la région de 40 km x 40 km (figs. V-1 et V-2). A l'échelle régionale, une perspective intéressante est l'estimation de la production. Comme l'on reproduit les profils temporels de réflectances et de NDVI sur une zone de 40 km x 40 km, la procédure de recombinaison des réflectances peut ainsi être utilisée pour simuler une production régionale à l'aide d'un modèle de culture.

De plus, le décalage temporel entre les simulations de réflectance entre 1991 et 1992 est cohérent avec le décalage obtenu entre les observations SPOT de 1991 et 1992. Les données satellitaires à haute résolution spatiale peuvent potentiellement être utilisées pour retrouver des conditions initiales représentatives à l'échelle de la région, d'une culture majoritaire, afin de ré-initialiser le modèle de fonctionnement.

recomposition du signal basse résolution

Nous avons estimé les réflectances modélisées à l'échelle de la région car l'assimilation d'observations satellitaires provenant d'images à haute résolution spatiale est limitée par le faible nombre d'acquisitions disponibles (faible fréquence temporelle et jours nuageux) pendant la période de croissance. Les données à faible résolution spatiale sont acquises fréquemment (chaque jour) et permettent le suivi du développement du couvert végétal. Nous utilisons des données acquises quotidiennement par le capteur NOAA AVHRR. A une résolution de 4 km, le profil temporel de réflectances AVHRR consiste en une combinaison de signaux provenant à la fois des cultures d'hiver et d'été. La zone d'étude est homogène, c'est à dire que les classes de végétation représentées sont distribuées uniformément sur la région. La présence des céréales d'hiver sur 65% de la surface sélectionnée permet l'utilisation d'un modèle de croissance pour quasiment 2/3 de la zone. Ainsi, les profils temporels de réflectances sur la région sont simulés en utilisant les résultats du modèle pour les céréales d'hiver, et des valeurs estimées pour les classes résiduelles.

Pour l'analyse à l'échelle régionale, les hypothèses sont différentes de celles faites pour l'analyse à l'échelle de la parcelle. Tout d'abord, bien que la carte d'occupation du sol et les enquêtes terrain fournissent une information statistique représentative de l'ensemble de la région, la spatialisation des données sur les parcelles (par exemple la date de semis) à

l'échelle régionale est inconnue. Deuxièmement, de nombreux types de végétation sont présents sur des pixels de 4 km par 4 km. Les signaux radiométriques simulés prennent en compte chacune de ces classes et leur pourcentage relatif, en utilisant soit des réflectances calculées empiriquement, soit des réflectances simulées. Les profils temporels de réflectances estimés pour les catégories autres (35% de la surface totale) que les céréales d'hiver ont été obtenus en utilisant des mesures radiométriques de terrain et les observations SPOT. Pour les réflectances des céréales d'hiver (65% de la surface totale), nous avons appliqué la méthodologie validée à l'échelle de la parcelle. Les profils temporels des réflectances modélisées et observées ont été comparés. Pour les acquisitions les plus précoces, le LAI est très faible (le débourrage de printemps apparaît début avril), et une forte proportion de sol nu est observée par les capteurs. Donc, à l'échelle régionale, la fraction de sol couverte par les céréales d'hiver a été prise en compte, et a amélioré la simulation. A cette échelle, il n'est pas nécessaire de modéliser de façon précise les cultures minoritaires, mais des modèles de croissance pour l'orge d'hiver (30% de la surface totale) et pour le pois (20%) seraient utiles. La comparaison des profils temporels de réflectances observées et modélisées a montré que l'augmentation des 2 signaux (modélisé et observé) apparaît environ à la même période. Ainsi, à l'avenir, les mesures de faible résolution spatiale pourraient être utilisées pour contrôler la modélisation du développement phénologique, à condition que les cultures dominantes et les dates de semis soient connues et qu'un modèle de croissance de culture suffisamment précis (ajusté au site géographique et aux conditions climatiques) soit disponible pour les cultures majoritaires.

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

La thématique de cette étude est basée sur le couplage entre un modèle de fonctionnement de la végétation et des observations satellitaires et plus précisément sur l'intégration d'observations satellitaires dans les modèles de fonctionnement. L'objectif à long terme est d'obtenir une description du fonctionnement de la végétation et de ses échanges avec l'atmosphère et le sol à l'échelle globale. Dans le cadre de cette thèse, afin de contrôler au mieux les paramètres influant sur la végétation, nous nous sommes limités aux zones de grandes cultures tempérées. On souhaite suivre le développement du couvert végétal par l'utilisation conjointe des observations satellitaires et d'un modèle de fonctionnement de culture. Le principal site d'étude est situé en Beauce (1991 et 1992). Les modèles couplés AFRCWHEAT2 et SAIL sont utilisés pour reproduire les réflectances observées dans les bandes de longueurs d'onde de SPOT HRV et NOAA AVHRR. Les observations satellitaires sont ensuite utilisées pour contraindre la modélisation.

VI-1. SYNTHÈSE DES RESULTATS - DISCUSSION

VI-1.1. Sensibilité des données et modèles utilisés

Prédiction d'un LAI avec un modèle de fonctionnement

Le profil temporel de LAI observé sur une parcelle expérimentale a été comparé à la simulation obtenue avec le modèle AFRCWHEAT2. Pendant la phase de croissance, pour un jour donné, la simulation sous-estime l'observation. Le retard de la simulation sur l'observation est de quelques jours (inférieur à une semaine). Il est regrettable qu'un seul jeu de données (LAI et réflectances) ait été disponible pour estimer la fiabilité des simulations données par le modèle de fonctionnement. Si l'on s'en tient aux résultats obtenus pour ce jeu de données, il est à craindre que ce décalage temporel simulé au niveau du développement soit systématique. Si tel est le cas, ce décalage temporel sera reproduit sur les profils temporels de réflectances obtenus à partir des LAI simulés par AFRCWHEAT. Ceci est d'autant plus important que la qualité de l'ajustement de paramètres est très fortement liée à la qualité de la simulation en mode direct des observations satellitaires.

Prédiction d'une réflectance avec un modèle de transfert radiatif

On a reproduit les profils temporels de mesures radiométriques terrain effectuées sur 9 parcelles de blé d'hiver situées en Camargue. La simulation a été obtenue avec un modèle de transfert radiatif en utilisant en entrée des mesures de LAI et de réflectances de sol. La façon de prendre en compte la structure de la végétation (distribution angulaire des feuilles) et le sol sous-jacent, et le choix d'un modèle de transfert radiatif ont été discutés. Les réflectances simulées sont très sensibles aux paramètres perturbateurs tels que la distribution angulaire des feuilles et les réflectances du sol. La meilleure façon de prendre en compte la structure du couvert a été de considérer une distribution angulaire de feuille sphérique. Parmi 4 modèles de réflectance, SAIL (Verhoef, 1984) conduit à des réflectances simulées les plus proches des observations. L'indice de végétation NDVI permet d'atténuer l'erreur due à la méconnaissance de certains paramètres, on obtient pour l'ensemble des parcelles (111 points) un coefficient de corrélation de 0.93, une erreur quadratique moyenne de 0.1 et une erreur relative de 18%. La grande variabilité temporelle des réflectances de sol mesurées rend la simulation des réflectances de couvert très variable en début de croissance. Les valeurs sont souvent supérieures aux observations, il y a cependant une cohérence entre les valeurs obtenues pour les 2 longueurs d'onde. La simulation des profils temporels de réflectances du couvert est très sensible à l'évolution temporelle des propriétés optiques du sol. Cette conclusion pose le problème de la reproduction des réflectances de couvert à l'échelle régionale, pour laquelle la signature spectrale du sol n'est pas disponible. L'effet de la variabilité des réflectances de sol est toutefois très atténué lorsque l'on calcule le NDVI.

Calcul d'une réflectance de surface à partir d'une observation satellitaire

Pour les données haute résolution spatiale SPOT HRV largement utilisées dans cette étude, les comptes numériques donnés par le capteur sont étalonnés. Les réflectances au sommet de l'atmosphère ainsi obtenues sont corrigées des effets atmosphériques grâce à un modèle qui simule les divers phénomènes perturbant le rayonnement électromagnétique lors de sa traversée de l'atmosphère. L'incertitude ayant l'impact le plus important sur la restitution des réflectances de surface concerne la méconnaissance de l'évolution temporelle des

contenus en vapeur d'eau et en aérosols de l'atmosphère. Si l'incertitude sur ces paramètres est très grande (supérieure à 50%), on obtient une erreur relative pour la réflectance de 7% dans le PIR et 12% dans le visible.

VI-1.2. Simulation en mode direct - Haute résolution spatiale

L'objectif de cette partie est de présenter une méthodologie pour modéliser les mesures satellitaires acquises dans les courtes longueurs d'onde au dessus d'un couvert de culture. C'est une étape préliminaire avant de pouvoir appliquer les techniques d'inversion des données satellitaires dans le but de retrouver la production d'une culture à l'échelle d'une région. Les profils temporels des observations satellitaires sont simulés sur une zone agricole, à l'échelle de la parcelle (20 m, SPOT HRV) en utilisant un modèle mécaniste (AFRCWHEAT2) couplé à un modèle de transfert radiatif (SAIL). Pour des parcelles de blé d'hiver individuelles, les réflectances observées sur des scènes SPOT HRV pour cinq dates pendant la saison de croissance des céréales ont été reproduites.

On a ensuite cherché à reproduire une variation inter-annuelle du signal radiométrique observé. Les profils temporels de signaux radiométriques satellitaires (SPOT HRV) ont été simulés à l'échelle de la parcelle au cours de deux saisons végétatives consécutives pour 4 parcelles. De façon quasi-systématique, la simulation des réflectances PIR en début de croissance est sous-estimée par rapport à l'observation. Deux hypothèses permettent d'expliquer cette différence entre les modèles couplés et les mesures: (i) méconnaissance de la dynamique temporelle des réflectances du sol sous-jacent, (ii) problème de prédiction du phasage temporel de LAI par le modèle de culture. On note toutefois que les variations inter-annuelles observées sont reproduites par les modèles couplés. On a montré que l'impact de paramètres intervenant sur la phénologie de la plante et ainsi sur la production (date de semis, caractéristiques variétales et conditions météorologiques) peut être reproduit.

On conclut ainsi que le problème majeur est de reproduire en mode direct des réflectances pendant la phase de croissance, pour des conditions données (date semis/variété/climat). La

difficulté ne se situe donc pas au niveau de la reproduction d'une variation inter-annuelle du signal radiométrique due à une variation d'un des 3 groupes de facteurs précédemment mentionnés, à condition que la sensibilité des modèles à ces facteurs soit significative.

VI-1.3. Assimilation d'observations satellitaires - Haute résolution spatiale

Comme le modèle de croissance permet de simuler des variables intéressantes concernant la productivité, on utilise les mesures satellitaires pour contraindre le modèle: des paramètres mal connus peuvent être initialisés pour obtenir le meilleur ajustement possible entre la simulation et l'observation. On suppose que la correction de l'état initial du modèle peut être obtenue en minimisant la différence entre les réflectances observées et simulées. On ajuste une condition initiale (la date de semis) du modèle de croissance. La date de semis contrôle la croissance et le développement de la culture dans des conditions environnementales données et influence les flux de carbone. Ainsi, la connaissance de ce paramètre est nécessaire à l'obtention d'une modélisation fiable issue d'AFRCWHEAT2. Pour éviter de retenir une solution correspondant à un minimum local, les procédures de minimisation sont utilisées en testant diverses dates initiales.

L'assimilation de données réelles (réflectances visible et PIR issues de 4 scènes SPOT HRV) a été effectuée de façon satisfaisante sur une parcelle enquêtée pour laquelle la simulation directe est fidèle aux observations. Après ajustement, on retrouve la date de semis réelle avec une erreur de 3 jours. On estime alors la production (NPP et rendement) en utilisant la date de semis retrouvée en entrée du modèle de croissance. La différence date de semis ajustée/date de semis réelle n'a pas d'impact significatif sur l'estimation de la production (erreur de 3%).

On a effectué une étude de faisabilité concernant l'assimilation des observations satellitaires dans un modèle de fonctionnement. Un jeu de simulations a été utilisé en tant que référence (observations synthétiques) pour discuter de l'optimisation de la fréquence temporelle des observations, du nombre des acquisitions, des dates d'acquisition et de la précision sur les observations. La qualité de l'estimation de variables telles que les flux de

carbone dépend à la fois du nombre d'acquisitions et de la distribution temporelle des acquisitions. Les meilleurs ajustements ont été obtenus avec des dates d'acquisition précoces (pendant la phase de croissance du signal PIR). Les périodes d'acquisition les moins intéressantes en matière d'ajustement sont la fin du cycle végétatif et le maximum d'activité de la culture (pic de signal PIR). Une erreur positive $\geq 10\%$ sur les observations a un impact significatif sur l'estimation de la production.

Dans des conditions favorables, c'est à dire lorsque le profil radiométrique est correctement reproduit et qu'au moins une observation est disponible au début de la croissance du couvert, l'assimilation conduit à des résultats satisfaisants. L'allure de la fonction coût est très sensible au nombre et au positionnement des acquisitions au cours du cycle saisonnier. Or, plus le minimum de la fonction coût est marqué, moins l'incertitude sur le paramètre ajusté sera grande. Donc, afin d'optimiser la qualité des résultats obtenus, il sera de notre intérêt d'effectuer l'étude la plus exhaustive possible en testant un maximum de combinaisons de conditions d'observation et de simulation (position, fréquence, et erreur sur la mesure, incertitude de la simulation,...).

VI-1.4. Vers l'échelle régionale: le compromis résolution spatiale/résolution temporelle

Recomposition du signal radiométrique des parcelles de blé d'hiver de la région

Pour deux années consécutives, le signal SPOT HRV observé sur l'ensemble des parcelles de blé d'hiver de la région a été recomposé. Des réflectances ont été simulées par les modèles couplés AFRCWHEAT2/SAIL pour toutes les combinaisons de date de semis/variétés observées sur les parcelles enquêtées. La recomposition des profils radiométriques attribués au blé tient compte de la proportion de chaque combinaison disponible au niveau des parcelles surveillées. La carte d'occupation du sol permet de sélectionner les pixels SPOT HRV correspondants à des parcelles de blé. Le signal recomposé reproduit grossièrement les quelques observations SPOT HRV disponibles pour ces deux années.

L'aspect intéressant de cet exercice réside dans la prévision d'une variation inter-annuelle des profils de réflectances: le décalage inter-annuel observé sur les simulations est cohérent avec le décalage observé sur les données SPOT. Une carte d'occupation du sol est toutefois indispensable à l'utilisation d'observations haute résolution spatiale. En outre, la fréquence temporelle conduit à un faible nombre d'acquisitions disponibles au cours d'une saison de croissance.

Modélisation du signal basse résolution NOAA AVHRR

Les profils temporels des données satellitaires ont été simulés sur une zone agricole à l'échelle de la région (4 km, NOAA AVHRR), en utilisant un modèle mécaniste de culture (AFRCWHEAT2) et un modèle de transfert radiatif (SAIL). Les données NOAA AVHRR basse résolution spatiale, utilisées pour l'étude régionale, correspondent à la réponse de divers groupes végétaux. La fraction de surface occupée par chaque type de végétation a été prise en compte. Les réflectances des céréales d'hiver (2/3 de la surface totale) ont été simulées par les méthodes validées à l'échelle de la parcelle et des réflectances modélisées empiriquement ont été utilisées pour les autres espèces. Bien qu'un pixel AVHRR consiste en une combinaison de signaux caractéristiques de plusieurs catégories de végétation, les réflectances simulées et observées à l'échelle de NOAA AVHRR sont globalement en accord. La fréquence temporelle élevée des observations basse résolution permet de s'assurer que l'on reproduit correctement la phénologie de la végétation. La difficulté ici est de reproduire un signal résultant des contributions de divers groupes de végétation. L'intérêt est de pouvoir utiliser un modèle de fonctionnement afin de prédire la production du couvert, il est donc préférable qu'il y ait une culture dominante au niveau du site.

L'utilisation de la basse résolution spatiale semble prometteuse. On ne peut toutefois pas se prononcer quant à la possibilité d'assimiler de telles observations dans un modèle de fonctionnement. Il faut avant tout s'assurer qu'une variation des paramètres pertinents en terme d'ajustement soit perceptible au niveau du signal radiométrique basse résolution.

VI-1.5. Conclusions - Améliorations nécessaires

Avant d'envisager d'aller plus loin, certains points méritent d'être approfondis, en particulier:

- nécessité d'étalonner le modèle de fonctionnement de façon plus rigoureuse afin d'être en mesure de reproduire une dynamique temporelle de LAI en amplitude et en phase,
- le NDVI permet d'atténuer l'impact d'effets perturbateurs tels que la variabilité temporelle du sol et les effets directionnels, il faut cependant discuter des avantages et inconvénients de l'utilisation d'un indice de végétation à la place des réflectances pour l'assimilation.
- afin de valider la méthodologie décrite, il faut s'assurer que l'on peut reproduire un signal radiométrique basse résolution dans diverses configurations (site, météorologie, type de culture).

VI-2. PERSPECTIVES

VI-2.1. Objectif: assimilation d'observations "régionales"

Les mesures satellitaires peuvent nous aider à retrouver des paramètres pertinents concernant le développement phénologique de la plante, telles que les conditions initiales de croissance. Les paramètres pertinents seront ceux qui influencent fortement à la fois le comportement de variables d'état intéressantes comme les flux de carbone, et les profils temporels des signaux radiométriques. Dans cette étude, le paramètre pertinent retenu est la date de semis, qui peut être utilisée pour initialiser les modèles de croissance qui décrivent les mécanismes biophysiques et estiment la production d'une culture. La date de semis peut être retrouvée à l'échelle de la parcelle par "assimilation" des réflectances SPOT dans un modèle de croissance (Moulin and Fischer, 1993; Kergoat *et al.*, 1994). Ainsi, on retrouve une condition initiale en assimilant des observations satellitaires acquises plusieurs mois après l'événement considéré (semis). Une information comme la date de semis, relative à la phénologie des plantes peut être introduite dans le modèle de couvert pour simuler la production régionale. L'assimilation des observations satellitaires est un

moyen d'accéder à la spatialisation des échanges (de matière et d'énergie) en fonction du temps.

On souhaite pouvoir utiliser les observations satellitaires pour retrouver des conditions initiales, inconnues à l'échelle d'une région, d'une culture majoritaire, pour ré-initialiser le modèle de fonctionnement. En particulier, on souhaite vérifier si "l'assimilation" dans les modèles peut être effectuée à partir d'observations satellitaires régionales, lorsque les cultures sont dominantes dans le paysage. Il s'agit en fait de retrouver des conditions initiales représentatives d'une culture majoritaire sur une région.

VI-2.2. L'alternative

Une alternative se présente concernant le choix de la résolution spatiale utilisée (haute ou basse). Dans une perspective d'assimilation d'observations spatiales, les avantages et inconvénients des deux types de capteurs sont résumés ici :

- utilisation de la haute résolution spatiale :

avantages : (i) la résolution spatiale est suffisamment fine pour ne travailler qu'avec des pixels de blé, à condition qu'une classification d'occupation du sol soit disponible. Ceci signifie également que l'on peut travailler sur une culture qui n'est pas forcément majoritaire au niveau de la région, (ii) les angles de visée sont faibles par rapport à ceux obtenus avec des capteurs basse résolution spatiale, (iii) certaines caractéristiques sont mieux contrôlées à haute résolution spatiale (géométrie, ennuagement, contenu en aérosols...)

inconvénients : (i) l'assimilation est limitée par le faible nombre d'acquisitions disponibles (faible fréquence temporelle et jours nuageux) pendant la période de croissance.

- utilisation de la basse résolution spatiale :

avantages : Les données de faible résolution spatiale sont acquises fréquemment (chaque jour) et permettent le suivi du développement du couvert végétal.

inconvénients : (i) les conditions de visée de la basse résolution induisent des effets directionnels plus importants qu'à haute résolution, (ii) la faible résolution spatiale nous

oblige à simuler les composantes radiométriques de groupes de végétation qui *a priori* ne nous intéressent pas; il est ainsi préférable que la culture étudiée soit largement majoritaire (exemple: la grande plaine du Dakota, majoritairement recouverte de blé de printemps).

VI-2.3. Utilisation conjointe des haute et basse résolutions spatiales

Il est clair qu'à l'avenir, on aura tout intérêt à utiliser de façon conjointe la haute et la basse résolution spatiale. On peut d'ores et déjà envisager de coupler les données haute résolution spatiale et faible répétitivité SPOT HRV et les données faible résolution spatiale et haute répétitivité NOAA AVHRR. Toutefois, la difficulté majeure de ce type d'exercice est de jongler avec des observations acquises dans des conditions différentes en terme :

- de dates d'acquisition et donc de conditions d'enneuagement et de composition de l'atmosphère,
- de géométrie d'acquisitions (angles de visée et angles solaires),
- de bandes spectrales (largeur de bande et longueur d'onde centrale).

Aux vues de notre perspective de mise en oeuvre des méthodologies d'assimilation lorsque peu d'informations sont disponibles (dans le double objectif d'extension des techniques à la végétation naturelle et d'estimation de la production), le lancement du satellite SPOT4 est d'un grand intérêt.

En effet, à bord de cette plate-forme seront embarqués un instrument haute résolution spatiale et faible répétitivité (HRVIR) et un instrument basse résolution spatiale et haute répétitivité (VEGETATION). VEGETATION (1x1 km² environ) présente l'avantage de posséder des bandes spectrales identiques à celles d'HRVIR (20x20 m²). En outre, certaines acquisitions étant effectuées dans les mêmes configurations pour les deux capteurs, les observations seront directement comparables (superposabilité géométrique et spectrale des données).

Nous envisageons donc de poursuivre les recherches amorcées au cours de cette thèse dans le domaine de l'assimilation d'observations satellitaires en vue de contraindre un

modèle de fonctionnement. Les sites permettant la mise en oeuvre de ces travaux concernent deux grandes zones agricoles tempérées :

- le site de la Beauce (culture majoritaire : céréales d'hiver)
- le site du Nord-Dakota (culture majoritaire : blé de printemps)

Concernant ce second site, un stage effectué au sein d'une équipe de télédétection de l'USDA (United States Department of Agriculture, Beltsville, Maryland) a permis la mise en place d'un projet commun en vue d'estimer la production à l'échelle régionale.

Ainsi, les futurs objectifs visent essentiellement à établir des méthodologies permettant de s'affranchir de la connaissance de nombreuses informations. Les résultats souhaités sont :

- la mise au point de stratégies d'inversion en milieu contrôlé qui seront utilisables pour la végétation naturelle,
- l'évaluation de la production primaire nette à l'échelle régionale pour améliorer la prise en compte des régions agricoles au sein des modèles globaux de productivité primaire,
- l'estimation du rendement des cultures en utilisant des modèles décrivant avec précision les processus biophysiques régissant le fonctionnement de la plante.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Addiscott, T.M., and Whitmore, A.P., 1991, Simulation of solute leaching in soils of different permeabilities, *Soil Use and Management*, **7**, 94-102.
- Allen W.A., Richardson A.J., 1968, Interaction of light with plant canopy, *J. Opt. Soc. America*, **58**(8) : 1023-1028.
- Allen W.A., et al., 1970, Plant canopy irradiance specified by the Duntley equations, *J. Opt. Soc. Am*, **60**(3) : 372-376.
- Andrieu B., and Baret, F., 1993, Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements, in *Crop Structure and Light Microclimate Characterization and Applications*, Varlet-Grancher C. (ed), Bonhomme R. (ed), Sinoquet H. (ed), INRA ed "Science Update", p285-322.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and J.L., Hatfield, 1984, Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agronomy Journal*, **76**:300-306.
- Baker, C.K., Gallagher, J.N., and Monteith, J.L., 1980, Daylength change and leaf appearance in winter wheat, *Plant, Cell and Environment*, **3**, 285-287.
- Baret, F., 1986, Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud-Orsay, n° d'ordre : 98, 182 pp.
- Baret, F., 1988, Un modèle simplifié de reflectance et d'absorptance d'un couvert végétal. *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote sensing*, 18-22 January 1988, Aussois, France, ESA SP-287.
- Baret, F., Guyot, 1991, Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assesment, *Remote Sens. Environ.*, **35**:161-173

- Baret, F., and Olioso, A., 1989, Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé, *Agronomie*, **9**:885-895
- Bordes, P., Brunel, P., and Marsouin, A., 1992, Automatic adjustment of AVHRR navigation, *Atmos. Oceanogr. Technol.*, **9**:15-27.
- Bouman, B.A.M., 1991a, Linking X-band radar backscattering and optical reflectance with crop growth models. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands. 169 pages, 21 Tables, 44 Figures.
- Bouman, B.A.M., 1991b, The linking of crop growth models and multi-sensor remote sensing data, in *Proceedings Fifth International Colloquium on 'Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing'*, 14-18 January 1991, Courchevel, France, ESA, Paris, SP-**319**:583-588.
- Bouman, B.A.M., 1992, Growth models to simulate crop growth, optical reflectance and radar backscatter of sugar beet and winter wheat, calibrated for Flevoland, Centre for Agrobiological Research, Report 163, August 1992, Wageningen, The Netherlands.
- Bunnik, N.J.J., 1978, The multispectral reflectance of short-wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties, H. Vennman and Zonen, B.V. Wageningen, The Netherlands, 175 pp.
- Campbell, G.S., 1986, Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution, *Agric. Forest Meteorol.* **36**:317-321.
- Chance J.E., 1981, Crop identification and Leaf Area Index calculations with Landsat multispectral data, *Int. J. Remote Sens.*, **2**:1-14.
- Chandrasekhar, S., 1950, Radiative Transfer, Oxford : Clarendon Press.

- Charles-Edwards, D.A., 1978, An analysis of the photosynthesis and productivity of vegetable crops in the United Kingdom, *Annals of Botany*, **42**, 717-731.
- Clevers, J.G.P.W., 1986, Application of remote sensing to agricultural fields trials, *Thesis*, Wageningen, 86-4.
- Dauzat, J., 1985, modélisation des transferts au sein de couverts végétaux sur la base de données obtenues par un système optoélectronique de points quadrats, *Thèse USTL*, Montpellier, France.
- Delécolle, R., and Guérif, M., 1988, Introducing spectral data into a plant process model for improving its prediction ability, *Proc. 4th Int. Coll. Signatures Spectrales d'objets en Télédétection*, Aussois, France, 18th-22th January 1988. ESA-SP287, pp 125-127.
- Delécolle, R., Maas, S.J., Guérif, M., and Baret, F., 1992, Remote sensing and crop production models. Present trends, *ISPRS, Photogramm. Remote Sens.*, **47**:145-161.
- Derien, M., Farki, B., Le Gleau, H., and Sairouni, A., 1992, Vegetation cover mapping over France using NOAA-11/AVHRR. *Int. J. Remote Sens.*, **13**:1787-1795.
- Dulk, J. A. den, 1989, The interpretation of remote sensing, a feasibility study, Ph. D. Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 173 pages.
- Duntley, S.Q., 1942, The optical properties of diffuse materials, *J. Opt. Soc. Amer.*, **32**, 61-70.
- Faivre, R., and Fischer, A., 1995, Predicting crop reflectances using satellite data observing mixed pixels. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, in revision.
- Fischer, A., 1994, A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sens. Environ.*, **48**:220-230.

- Fischer, A., Moulin S., Guyot G., Guérif, M., Delécolle, R., X.F. Gu, Dedieu, G., and F., Baret, 1995, Regional Yield Estimation from the Coupling of Crop Production Models and Satellite Data, *Agronomie*, submitted.
- Gallagher, J.N., 1979, Field studies of cereal leaf growth. I., Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny, *Journal of Experimental Botany*, **30**, 625-636.
- Garcia, R., Kanemasu, E.T., Blad, B.L., Bauer, A., Hatfield, J.L., Major, D.J., Reginato, R.J., Hubbard, K.G., 1988, Interception and use of light in water wheat under different nitrogen regimes, *Agriculture and Forest Meteorology*, **44**, 175-186.
- Garratt, J.R., 1993, Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments- a review. *Journal of Climate*, **6**:419-449.
- Goel, N.S. and Strebel, D.E., 1983, Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating Agronomic variables I : Problem definition and initial results using Suit's model. *Remote Sens. Environ.* , **13**, 487-507.
- Goel, N.S., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, *Remote Sens. Rev.* **4**:1-212.
- Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.M., Lemaire, G., 1986, Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétale, *Agronomie*, **6**(1), 47-56.
- Guérif M., Delécolle R., Gu X.F., Guinot J.P., Jappiot M., Steinmetz S., 1988, Estimation de la biomasse et du rendement de cultures de blé dur à partir des indices de végétation SPOT, *Proceedings of 4ème Colloque International des Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Aussois(FRA), 1988, ESA SP. (NLD), 287, 137-141.

- Guérif, M., De Brisis, S., Seguin, B., 1993, Combined NOAA-AVHRR and SPOT HRV data for assessing crop yields of semiarid environments, *EARSeL Advances in Remote Sensing*, Vol. 2, n°2-VI, pp.110-123.
- Guyot, G., 1984, Caractéristiques spectrales des couverts végétaux, application à la télédétection, *Bull. Soc. Franc. Photogram. et Télédétection*, 95 (3), 8 pp.
- Guyot, G., 1995, Application de la télédétection aux statistiques agricoles, in *Manuel de Télédétection*, Vol. 2 Applications, F. Bonn et G. Rochnon Ed., Les Presses universitaires du Québec, in press.
- Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology : a simulation study (PUDOC, Wageningen, The Netherlands), pp 249.
- Henry, P., Dinguirard, M., and Meygret, A., 1995, Document de synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT, in CT/IA/QTIS/PO n°136, February 9 1995, CNES, Toulouse, 21 pp, (in french).
- Huete, A., 1988, A soil adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sens. Environ.*, **25**:295-309.
- IBSNAT, 1993, International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, 2500 Dole Street, Krauss 18, Honolulu, HI 96822, USA, IBSNAT views, September 1993, n°1.
- Idso, B. and de Wit, C.T., 1970. Light relations in plant canopies, *Appl. Opt.*, **9**, 177-184.
- Jackson, R.D., and Pinter, P.J., Jr, 1986, Spectral responses of architecturally different wheat canopies, *Remote Sens. Environ.*, **20**:43-56.
- Jacquemoud, S., Flasse, S., Verdebout, J., and Schmuck, G., 1993, Comparison of Several Optimization Methods to Extract Canopy Biophysical Parameters - Application to Caesar data, *Proceedings 6th International Symposium Physical Measurements and*

- Signatures in Remote Sensing ISPRS*. 17-21 January, 1994, Val d'Isère, France, CNES, Paris, pp. 291-298.
- Jappiot, M., 1987, Estimation de la biomasse d'une culture de blé à partir des indices de végétation SPOT, essai d'estimation de rendement, Mémoire de DEA, Université Saint Jérôme, Marseille, 27p.
- Jordan, C.F., 1969, Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 50:663-666.
- Kaufman, Y.J., and Holben, B.N., 1993, Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint, and desert reflection, *Int. J. Remote Sens.*, 14:21-52.
- Kenny G.J., and Harrison, P.A., 1992, Regional (Europe-wide) Estimation of Wheat Phenology using AFRCWHEAT, *Effects of Global Change on Wheat Ecosystem, GCTE (IGBP) workshop report*, Saskatoon, Canada, 22th-24th July 1992, 60 pp.
- Kerdiles, H., Grondana, M., 1994, Crop acreage subpixel estimation from NOAA AVHRR data: A Test Study in the Pampa region, Argentina, *Proc. of the European Symposium on Satellite Remote Sensing*. Roma, Italy, 26th-30th September 1994, EUROPTO series.
- Kergoat, L., Fischer, A., Moulin, S. and Dedieu, G., 1995, Satellite measurements as a control for vegetation carbon budget, *Tellus*, 47B:251-263.
- Kubelka, P., and Munk, F., 1931, Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, *Z. Tech. Physik*, 12, 593.
- Kumar, M., and Monteith, J.L., 1981, Remote sensing of crop growth. In : *Plants and the Daylight Spectrum* (H. Smith ed.). Academic, New York, pp 133-144.
- Kuusk, A., 1983, The hot spot effect of a uniform vegetative cover, *Earth Res. Space*, 4:90-99 (Russian).

- Kuusk, A., 1991(a), The hot spot effect in plant canopy reflectance, in Photon-vegetation interactions. Applications in optical remote sensing and plant ecology, Myneni and Ross eds, Springer Verlag, pages 139-159.
- Kuusk, A., 1991 (b), Determination of vegetation canopy parameters from optical measurements, *Remote Sens. Environ.*, **37**:207-218.
- Lagouarde, J.P., Brunet, Y., Kerr, Y.H., Imbernon, J., 1991, Estimating the daily upward longwave radiation from NOAA AVHRR data for mapping net radiation, *Adv. Space Res.*, Vol 11(3), 151-161.
- Leblon, B. and Guérif, M., 1991, Spectral estimates of PAR interception and biomass production of irrigated rice crops. Model validation with SPOT data, in *Proceedings of the 5th International Colloquium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. 14-18 January, 1991, Courchevel, France. ESA, Paris, SP-319:573-576.
- Leblon, B., Guérif, M., and Baret, F., 1991, The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice, *Remote Sens. Environ.*, 38, 147-158.
- London, J., Bojkov, R.D., Oltzman, S. and Kelley, J.I., 1976, Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967, NCAR/TN-113+STR, Boulder, CO.
- Lüdeke, M., Janecek, A., and Kohlmaier, G.K., 1991, Modelling the seasonal CO₂ uptake by land vegetation using the global vegetation index, *Tellus*, **43B**: 188-196.
- Lumsden, M.E., 1980, The influence of weather on the development of winter, B.Sc., *Thesis*, University of Bath.
- Maas, S.J., Richardson, A.J., Wiegand, C.L., and P.R. Nixon., 1985, Use of plant, spectral and weather data in modelling corn growth. *Proceedings of the 19th International*

- Symposium on Remote Sensing of Environment*. 21-25 October, 1985, Ann Arbor, MI, pp 167-186.
- 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, *Agron. J.*, **80**:655-662.
- Maas, S.J., Jackson, R.D., Idso, S.B., Pinter, Jr, P.J., Reginato, R.J., 1989, Incorporation of remotely sensed indicators of water stress in a crop growth simulation model. *Proc. of the 19th Conference on Agriculture and forest Meteorology, 7th-10th March 1989, Charleston, S. Carolina, Published by American Meteorological Society, Boston, Mass.*, pp:228-231.
- Maas, S.J., 1991, Use of remotely sensed information in plant growth simulation models, *Adv. Agron.*, **1**:17-26.
- Major, D.J., Schaalje, G.B., Wiegand, C., and Blad, B.L., 1992, Accuracy and sensitivity analyses of SAIL model-predicted reflectance of maize, *Remote Sens. Environ.*, **41**:61-70.
- Monteith, J.L., 1977, Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Philos.Trans. R. Soc. Lond.* B281, 277-294.
- Moulin, S. and Fischer, A., 1993, Simulation of the temporal variations of NOAA/AVHRR reflectances. Coupling of functioning model and satellite data., in *Proceedings 6th European AVHRR Data Users' Meeting, 29 June - 2 July 1993, Belgirate, Italy, EUM, Darmstadt*, P **12**:277-283.
- Moulin, S., Fischer, A. and Delécolle, R., 1994, Assimilation of satellite measurements in short wavelengths into production model. Test of several radiative transfer models, *Proceedings 6th International Symposium Physical Measurements and Signatures in*

- Remote Sensing ISPRS*. 17-21 January, 1994, Val d'Isère, France, CNES, Paris, pp. 1127-1134.
- Moulin, S., Fischer, A., Dedieu, G., and 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 Sens. Environ.*, 54:261-272.
- Myneni, R.B., and Ross, J., 1991, Photon-vegetation interactions. Applications in optical remote sensing and plant ecology, Myneni and Ross eds, Springer Verlag, pp 565..
- Nichiporovich, A.A., 1961, On properties of plants as an optical system, *Soviet plant physiology* 8(5): 536-546 (in Russian).
- Nilson, T., and Kuusk, A., 1989. A reflectance model for homogeneous plant canopy and its inversion, *Remote Sens. Environ.*, 27:157-167.
- Oort, A.H., 1983, Global atmospheric circulation statistics 1958-1973, NOAA Professional Paper 14, Rockville, MD.
- Park, J.K., Deering D.W., 1982, Simple radiative transfer model for relationships between canopy biomass and reflectance, *Appl. Optics*, 21:303-309.
- Pinter, P.J., Jr., Jackson, R.D., Ezra, C.E., and Gausman, H.W., 1985, Sun angle and canopy architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars, *Int. J. Remote Sens.*, 6:1813-1825.
- Porter, J.R., 1984, A model of canopy development in winter wheat, *J. Agric. Sci. Camb.*, 102, 383-392.
- Porter, J.R., 1993, AFRCWHEAT2 : a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen., *Eur. J. Agron.*, 2:69-92.
- Porter *et al.*, 1993, Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth, *Field Crops Research*, 33:131-157.

- Puyou-Lascassies P., Podaire, A., Gay, M., 1994, Extracting crop radiometric responses from simulated low and high spatial resolution satellite data using a linear mixing model., *Int. J. Remote Sens.*, vol 15, n 18, 3767-3784
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., 1994, Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), *Remote Sens. Environ.*, 48, 2, 119-126.
- Rahman, H., and Dedieu, G., (1994), SMAC : a simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *Int. J. Remote Sensing*, vol 15, no 1, 123-143.
- Richardson, A.J., and Wiegand, C.L., 1977, Distinguishing vegetation from soil-background information., *Photogram. Engr. Remote sens.*, 43:1541-1542.
- Ripple, 1985, Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation, *Phot. Eng. Remote Sens.*, 43:1915-1921.
- Ross, J., and Nilson, T., 1975, Radiation exchange in plant canopies, in *Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, (D.A. de Vries and H.H. Afgan, EDS.), Scripta, Washington, DC, pp. 327-336.
- Ross, J., 1981, The radiation regime and architecture of plant stands, Dr W. Junk Publishers, The Hague, The Netherlands, 391p.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C., 1974, Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation, Type III, Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 371 pp.
- Running, S.W., Nemani, R.R., Peterson, D.L., Band, L.E., Potts, D.F., Pierce, L.L. and Spanner, M.A., 1989, Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation, *Ecology*, 70(4):1090-1101.

- Seguin, B., Lagouarde, J.P., Savane, M., 1991, The assesement of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data., *Remote Sens. Environ.*, 35, 141-148.
- Seguin, B., Fischer, A., Kerdiles, H., Louhala, S., Podaire, A., 1992, Suivi agroclimatique des cultures en France à partir des données NOAA, METEOSAT et SPOT. *Proceedings of the Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics*, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy, pp 339-342.
- Sellers, 1985, Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration, *Int. J. Remote Sens.*, 6(8), 1335-1372.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., and Dalcher, A., 1986, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, **43**:505-530.
- Semenov, M.A., Porter, J.R., Delécolle, R., 1993, Climatic change and the growth and development of wheat in the UK and France, *Eur. J. Agron.*, **2**(4):293-304.
- Sharman, M. and Boissezon, H., 1992, Action IV, de l'image aux statistiques : Bilan opérationnel après deux années d'estimations rapides des superficies et des rendements potentiels au niveau européen, *Proceedings of the Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics*, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy, JRC, Ispra, pp. 177-186.
- Spitters, C.J.T., van Keulen, H. and van Kraalingen, D.W.G., (1989), A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87, In *Simulation and systems management in crop protection*: 147-181, edited by R.Rabbinge, S.A. Ward and H.H. van Laar (PUDOC Wageningen, The Netherlands).
- Steinmetz, S., Guérif, M., Delécolle, R., Baret, F., 1990, Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat

- crop subjected to nitrogen and water deficiencies, *Int. J. Remote Sens.*, 11(10), 1797-1808.
- Suits, G.H., 1972, The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sens. Environ.*, 2:117-125.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., and Deschamps P.Y., 1990, Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum, *Int. J. Remote Sens.*, 11:659-668.
- Thorne, G.N., and Taylor, P.J., 1980, Factors limiting yields of winter wheat, Rothamsted Experimental Station, *Report for 1979*, Part1, pp. 18-19.
- Tucker, C.J., 1977, Asymptotic nature of grass vegetation, *Appl. Opt.*, 16(5):1151-1157.
- Tucker, C.J., and Miller, L.D., 1977, Soil spectra contributions to grass canopy spectral reflectance, *Photogram. Engr. Remote Sens.*, 43 (6): 721-726.
- Tucker C.J., Holben, B.N., Elgin, J.H., Mc Murtrey III, J.E., 1981, Remote Sensing of Total Dry Matter Accumulation in Winter Wheat, *Remote Sens. Environ.*, 11, 171-189.
- Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., and Van Ittersun, G., 1985, Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Production in the Senegalese Sahel 1980-1984, *Remote Sens. Environ.*, 17, 232-249.
- Tucker, C.J., Fung, I.Y., Keeling, C.D. and R.H., Gammon, 1986, Relationships between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index, *Nature*, 319:195-199.
- Vanderbilt, V.C., and Grant, L., 1985, Plant canopy specular reflectance model, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23:722-730.

- Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Artis, P., 1982, Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal, *Acta Oecologia. Oecol. Plant.*, vol 3 (17) n°1:3-26.
- Verhoef, W., 1984, Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the SAIL model. *Remote Sens. Environ.*, **16**:125-141.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R., and Rayner, J.H., 1984, A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations, *J. Agri. Sci., Camb.*, **102**:371-382.
- Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Jackson, R.D., Pinter, Jr P.J., Aase, J.K, Smika, D.E., Lautenschlager, L.F., McMurtrey III J.E., 1986, Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(1), 90-97.
- de Wit, C.T., 1965, Photosynthesis of Leaf Canopies, Agric. Res. Report No. 663, Wageningen, 57pp.
- SCEES, 1985, Stades phénologiques des principales cultures et télédétection, *SCEES, Méthodes et Applications Scientifiques*, n°12, Decembre 1985, Paris, p.53.

LISTE DES SYMBOLES

LAI: leaf area index ou indice foliaire

jj: jour Julien

Psat: sensibilité à la photopériode

Vsat: sensibilité à la vernalisation

ALA: angle moyen d'inclinaison des feuilles

θ : angle entre l'axe de la feuille et le plan horizontal

$f(\theta)$: distribution angulaire des feuilles

ETR: évapotranspiration

IV: indice de végétation

SR: simple ratio (Jordan, 1969)

NDVI: normalized difference vegetation index (Rouse *et al.*, 1974)

SAVI: soil adjusted vegetation index (Huete, 1988)

MSAVI: modified soil adjusted vegetation index (Qi *et al.*, 1994)

r: coefficient de corrélation

rmse: root mean square error ou erreur quadratique moyenne

T: épaisseur optique des aérosols

UH2O: contenu en vapeur d'eau

UOZ: contenu en ozone

NPP: net primary production ou production primaire nette

DM: dry matter ou matière sèche

J: fonction coût

SD: date de semis

n: nombre d'observations

ρ_i^{obs} : réflectance observée à la date i

ρ_i^{mod} : réflectance modélisée à la date i

i: numéro de date d'acquisition

$\bar{\rho}$: réflectance moyenne de la surface

ρ_i : réflectance de la classe i

s: surface totale de la zone d'étude

s_i : surface occupée par la classe i

rsol, Rsoil: réflectance de sol

L: indice foliaire local

L' : indice foliaire équivalent sur la surface

τ : couverture fractionnaire de la végétation

R: réflectance du couvert

R': réflectance du couvert avec prise en compte de la couverture fractionnaire

Les indices de végétation

1) SR = NIR/VIS;

2) NDVI = (NIR-VIS)/(NIR+VIS);

3) SAVI = (NIR-VIS)/(NIR+VIS+L)*(1+L);

4) MSAVI = (NIR-VIS)/(NIR+VIS+L')*(1+L'); $L' = 1 - 2 * \gamma * (NIR - VIS) / (NIR + VIS) * (PIR - \gamma * VIS)$;

VIS et PIR sont respectivement les réflectances dans le visible et dans le proche infra-rouge. Dans la formule du SAVI, L doit être ajusté au type de sol, mais dans la plupart des cas, L=0.5. Dans la formule du MSAVI, L' varie de 1 (sol nu) à 0 (végétation dense), γ est fixé à 1.06.

Les paramètres statistiques

1) r (coefficient de corrélation) = cov(x,y)/sx.sy

cov(x,y) est la covariance des séries x et y, sx est l'écart-type de la série x et sy est l'écart-type de la série y.

r est compris entre -1 et 1, il mesure la netteté de la liaison existant entre les deux séries de valeurs, pour autant que cette liaison soit linéaire ou approximativement linéaire.

2) rmse (root mean square error) = (som(x-y)²/n)^{1/2}

n: nombre d'observations,

la rmse est un paramètre de dispersion

3) erreur relative = (x-y)/x

x est la série de valeurs mesurées et y la série de valeurs simulées

LISTE DES ABREVIATIONS

LERTS: Laboratoire d'études et de recherches en télédétection spatiale
CESBIO: Centre d'études spatiales de la biosphère
CNES: Centre national d'étude spatiale
CNRS: Centre national de la recherche scientifique
UPS: Université Paul Sabatier
INRA: Institut national de la recherche agronomique
CEE: Communauté économique européenne
CCR: Centre commun de recherche
SCOT conseil: Service de consultance en observation de la Terre
SOTEMA: Société de télédétection en matière agricole
MARS: Monitoring agriculture by remote sensing
SPOT: Satellite pour l'observation de la Terre
HRV: haute résolution visible
NOAA: National oceanographic and atmospheric administration
AVHRR: Advanced very high resolution radiometer
SAIL: Scattering by arbitrarily inclined leaves
IR: infra-rouge
PIR: proche infra-rouge
TOA: top of the atmosphère
CMS: Centre de météorologie spatiale
SCEES: Service central des enquêtes et études statistiques
GMT: Greenwich meridian time
EXTRAD: Extinction of radiation
IBSNAT: International benchmark sites network for agrotechnology transfer
SUCROS: Simple and universal crop growth model
TM: Thematic mapper
MSS: Multi spectral scanner
GAC: Global area coverage
LAC: Local area coverage
HRPT: High resolution picture transmission
P: parcelle

LISTE DES FIGURES

- Figure I-1: Relations variables biophysiques télédéteectées et production.
- Figure I-2: Réflectance et transmittance d'une feuille.
- Figure I-3: Comparaison des réflectances d'un couvert et d'un sol nu.
- Figure I-4: Inversion: méthode de forçage.
- Figure I-5: Inversion: méthode de ré-étalonnage.
- Figure I-6: Inversion: méthode d'assimilation.
- Figure I-7: Modélisation de la réflectance de couvert, calcul de la réflectance de surface.
- Figure I-8: Méthode de simulation des profils temporels de réflectance.
- Figure I-9: Technique d'assimilation d'observations satellitaires.
- Figure I-10: Méthode de simulation du signal radiométrique basse résolution.
- Figure II-1: Localisation du principal site d'étude.
- Figure II-2: Distribution des dates de semis et des variétés de blé.
- Figure II-3: Occupation du sol, site Beauce 1992, zone de 40 km x 40 km.
- Figure II-4: Distribution des dates de semis du blé.
- Figure II-5: Distribution des variétés du blé.
- Figure II-6: Occupation du sol, site Beauce 1992, zone de 11 km x 20 km.
- Figure II-7: LAI mesurés. Site Camargue 1987.
- Figure II-8: LAI mesurés, variété Capdur. Site Camargue 1987.
- Figure II-9: LAI mesurés, variété Creso. Site Camargue 1987.
- Figure II-10: Réflectances de sol mesurées. Site Camargue 1987.
- Figure II-11: Conditions météorologiques 1990/1991 et 1991/1992. Site Beauce.
- Figure II-12: LAI mesurés et simulés, parcelle Grignon 1992.
- Figure II-13: Réflectances et NDVI mesurés et simulés, P5.
- Figure II-14: Corrélation $r_{sol\ PIR}/r_{sol\ visible}$, P1 à P10.
- Figure II-15: Réflectances mesurées et simulées, P1 à P10.
- Figure II-16: NDVI mesurés et simulés, P1 à P10.
- Figure II-17: NDVI en fonction de LAI, simulés et observés, P1 à P10.
- Figure II-18: Sensibilité des réflectances simulées aux paramètres perturbateurs.
- Figure II-19: Sensibilité du NDVI simulé aux paramètres perturbateurs.
- Figure II-20: Réflectances et NDVI observés et modélisés (3 distributions foliaires), P5.
- Figure II-21: Réflectances et NDVI observés et modélisés (influence du sol), P5.

- Figure II-22: Corrélation NDVI modélisés et observés (4 modèles de réflectance), Camargue 1987.
- Figure II-23: Réflectances mesurées et simulées (4 modèles de réflectances), P5.
- Figure II-24: NDVI mesurés et simulés (4 modèles de réflectances), P5.
- Figure II-25: Corrélation IV (indices de végétation) modélisés et observés, Camargue 1987.
- Figure III-1: Corrélation réflectances PIR SPOT et simulées (3 distribution foliaires), Beauce 1992.
- Figure III-2: LAI simulé.
- Figure III-3: Réflectances SPOT et simulées, Beauce 1992.
- Figure III-4: Sensibilité LAI simulé aux pratiques culturales et à la météorologie.
- Figure III-5: Variabilité inter-annuelle du LAI simulé.
- Figure III-6: Variabilité inter-annuelle des réflectances simulées et SPOT, PA à PD.
- Figure III-7: Variabilité inter-annuelle des NDVI simulés et SPOT, PA à PD.
- Figure III-8: Impact d'une variation de la date de semis sur la simulation et l'observation.
- Figure III-9: Impact d'une variation de variété sur la simulation et l'observation.
- Figure III-10: Impact d'une variation de forçage climatique sur la simulation et l'observation.
- Figure IV-1: Assimilation d'observations SPOT: profils temporels de réflectance.
- Figure IV-2: Sensibilité du LAI modélisé à la date de semis.
- Figure IV-3: Sensibilité des réflectances modélisées à la date de semis.
- Figure IV-4: Sensibilité de la NPP et du rendement à la date de semis.
- Figure IV-5: Fonction coût. Impact d'une erreur sur les caractéristiques variétales.
- Figure IV-6: Echantillonnage temporel: profils de réflectances.
- Figure IV-7: Echantillonnage temporel: fonctions coût.
- Figure IV-8: Nombre d'acquisitions: profils de réflectances.
- Figure IV-9: Nombre d'acquisitions: fonctions coût.
- Figure IV-10: Cas d'une acquisition: fonctions coût.
- Figure IV-11: Cas d'une acquisition: critère de concavité.
- Figure IV-12: Cas de deux acquisitions: critère de concavité.
- Figure IV-13: Cas de trois acquisitions: critère de concavité.
- Figure IV-14: Cas de quatre acquisitions: critère de concavité.
- Figure IV-15: Erreur sur l'observation: profils de réflectances.

Figure IV-16: Erreur sur l'observation: fonctions coût.

Figure IV-17: Comparaison des résultats obtenus avec des réflectances ou le NDVI.

Figure V-1: Profils de réflectance: simulation et observations SPOT régionales.

Figure V-2: Profils de NDVI: simulation et observations SPOT régionales.

Figure V-3: Comparaison des observations SPOT HRV et NOAA AVHRR.

Figure V-4: Profils empiriques de réflectance, classe du pois.

Figure V-5: Corrélation réflectances PIR modélisées et observées.

Figure V-6: Réflectances modélisées et AVHRR.

Figure V-7: NDVI modélisés et AVHRR.

Figure V-8: Couverture fractionnaire de la végétation.

Figure V-9: NDVI modélisés et AVHRR, prise en compte de la couverture fractionnaire.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Bandes spectrales du capteur HRV embarqué sur SPOT.

Tableau I-2: Bandes spectrales du capteur AVHRR embarqué sur NOAA.

Tableau II-1: Angles d'acquisition des observations satellitaires.

Tableau II-2: Description des parcelles PA, PB, PC et PD.

Tableau II-3: Paramètres d'entrée du modèle SAIL.

Tableau II-4: Distributions foliaires théoriques.

Tableau II-5: Variations des paramètres perturbateurs.

Tableau II-6: Paramètres d'entrée des 4 modèles de réflectance.

Tableau II-7: Comparaison des NDVI observés et modélisés avec 4 modèles de réflectances.

Tableau II-8: Comparaison de 4 IV observés et modélisés.

Tableau II-9: Réflectances et NDVI SPOT TOA et à la surface pour 2 classes de végétation.

Tableau II-10: Sensibilité des réflectances aux entrées du modèle de corrections atmosphériques.

Tableau III-1: Impact d'une variation des pratiques culturales ou du climat sur la productivité.

Tableau IV-1: Ajustement d'une condition initiale par assimilation d'observations SPOT.

Tableau IV-2: Ajustement de la date de semis, impact sur la productivité.

Tableau IV-3: Combinaisons d'acquisitions, cas d'une acquisition.

Tableau IV-4: Combinaisons d'acquisitions les plus favorables, cas de deux acquisitions.

Tableau IV-5: Combinaisons d'acquisitions les plus favorables, cas de trois acquisitions.

Tableau IV-6: Combinaisons d'acquisitions les plus favorables, cas de quatre acquisitions.

Tableau IV-7: Ajustement d'une condition initiale par assimilation d'observations biaisées.

ANNEXE I

DESCRIPTION DES MODELES

**ANNEXE A - UN MODELE DE CROISSANCE ET DE DEVELOPPEMENT D'UN
COUVERT DE BLE D'HIVER: AFRCWHEAT2 (Porter, 1984; Weir *et al.*, 1984;
Porter, 1993)**

A-1. INTRODUCTION

Une distinction est faite entre les processus de croissance de la céréale et ceux du développement. La croissance est vue comme le processus d'accumulation de matière sèche, impliquant l'interception de la lumière par la culture, la photosynthèse et la répartition des assimilats. Le développement se compose de 2 parties, les changements de l'état phénologique et les processus de développement végétal qui produisent une surface photosynthétique. Ce modèle prend en compte le développement phasique de la culture. Il simule le développement des feuilles et des tiges d'une culture de blé avec la température, les précipitations, et la durée du jour en tant que variables pilotes. Les autres facteurs d'environnement sont supposés être optimum et la culture est considérée en bonne santé.

Le modèle est constitué de 5 sous-modèles: développement phénologique, production de feuilles et de talles, production de racines, interception de la lumière et photosynthèse, répartition de la matière sèche et croissance du grain. Le modèle de production de feuilles et de talles décrit l'initiation et la mort des tiges et des feuilles. Les feuilles sont supposées croître et vieillir à un taux déterminé par l'intégrale temporelle de la température journalière moyenne (temps thermique en °C.j) au dessus d'un seuil de température de 1°C. Le temps thermique est aussi la variable pilote pour la production et la mort des tiges. Les tiges (talles) sont groupées par classe d'âge plutôt que par position morphologique (ordre des talles).

Le modèle de croissance et de développement est couplé à un modèle de bilan hydrique et de filtrage dans le sol (Addiscott and Whitmore, 1991).

A-2. DEVELOPPEMENT PHENOLOGIQUE

Les entrées du modèle sont la date de semis, la latitude du site, les températures journalières minimales et maximales. Il calcule les dates d'occurrence des stages de développement : émergence, apparition des "doubles-rides" au sommet de la tige principale, floraison et maturité.

Quatre types de temps thermiques sont utilisés. Pour la période du semis à l'émergence, le temps thermique est calculé en utilisant une température de base de 1 °C. De l'émergence au stade doubles-rides, ce temps thermique est modifié par des facteurs de vernalisation et de photopériode. Pour la période du stade doubles-rides à la floraison, ce temps thermique est seulement modifié par la photopériode. De la floraison à la maturité, le temps thermique est calculé en supposant une température de base de 9°C.

Temps thermique

Il (T_t) est calculé comme étant la somme de 8 contributions ($T_h - T_b$) chaque jour d'une variation cosinusoidale entre les températures maximales et minimales observées (les contributions négatives sont ramenées à zéro, T_b est une température de base). La contribution est réduite pour des températures supérieures à 26°C, et nulle pour des températures supérieures à 37°C.

Les effets de la photopériode

Le nombre d'heures de photopériode effective (PH) est calculé chaque jour. Lorsque au cours d'une journée, le seuil de photopériode (P_{sat} , par exemple 20, en nombre d'heures) est atteint ou dépassé, c'est à dire s'il y a 20 heures ou plus de photopériode effective, le temps thermique n'est pas réduit. S'il y en a moins, le temps thermique est proportionnellement réduit grâce à une multiplication par un facteur de photopériode (FP). Le nombre d'heures de photopériode effective est calculé en fonction de la latitude du site et du jour Julien grâce à la formule qui décrit le mouvement relatif de la Terre et du Soleil.

Chaque jour, le rayonnement de photopériode effective, commence et se termine lorsque le soleil a un angle de 6° au dessous de l'horizon.

$$FP=(PH - Pb)/(Psat - Pb);$$

Le nombre optimal d'heures de photopériode effective (Psat) est fixé en entrée, et le facteur de photopériode (FP) varie entre 0 et 1. Ainsi le facteur de photopériode peut réduire mais pas augmenter, l'accumulation du temps thermique. Le nombre d'heures de photopériode effective de base (Pb) est fixé à 0h de l'émergence au stade doubles-rides et à 7h du stade doubles-rides à la floraison.

La vernalisation

Le facteur de vernalisation utilisé pour modifier le temps thermique pendant la phase de croissance entre l'émergence et le stade doubles-rides dépend du passé de la plante en terme de température. Ce passé est résumé dans la notion de degrés jours vernalisés cumulés (VDD). Ces degrés jours vernalisés sont cumulés à partir du moment de la germination, bien que le facteur FV, dérivé de VDD, modifie le temps thermique seulement après l'émergence. Pour un jour donné, si la température maximale est supérieure à 30°C, la moitié du VDD accumulé jusqu'à ce jour est perdue.

Les contributions de températures Th (combinaison de températures minimale et maximale, 8 contributions par jour) sont utilisées pour calculer un facteur d'efficacité de la vernalisation Veff. Ce facteur dépend de Th: une vernalisation totale (Veff=1) est obtenue si Th est compris entre 3 et 10°C, Veff<1 si Th est compris entre -4 et 3°C, ou entre 10 et 17°C. La vernalisation cumulée VDD (jours de vernalisation) est le cumul de la somme pondérée des 8 contributions quotidiennes, à partir de la germination jusqu'au jour considéré.

Le facteur de vernalisation FV est:

$$FV=(VDD-Vb)/(Vsat-Vb);$$

Vsat (seuil de saturation au delà duquel les jours de "froid" n'ont plus d'effet) est fixé en entrée (par exemple 33, en jour de vernalisation), Vb est fixé à 8 jours de vernalisation, FV varie entre 0 et 1 (Lumsden, 1980).

Pour le calcul du temps thermique photovernalisé, la contribution quotidienne du temps thermique est multipliée par FP et FV.

A-3. PRODUCTION DE FEUILLES, DE TALLES ET DE RACINES

Les principales caractéristiques du modèle sont la simulation de l'émergence, la croissance et la sénescence des feuilles individuelles et la production de groupes de talles (cohorte) pendant une période phénologique définie, leur survie dépendant de l'âge de la cohorte et de la densité de population des pousses.

Production et survie d'une talle

Ce modèle décrit l'établissement d'une population de pousses (tiges) et la photosynthèse du couvert. Après l'émergence des tiges principales sur une période de temps définie, les feuilles émergent sur les tiges principales, avec un intervalle de temps thermique entre l'apparition des feuilles, fixé par un taux de changement de la longueur du jour à l'émergence (Baker *et al.*, 1980). Après l'émergence de la troisième feuille sur les tiges principales et jusqu'au stade doubles-rides pour le sommet de la tige principale, un nombre de talles (par m²) est produit chaque semaine en utilisant un taux de production de tige (nombre de tiges/(deg.jour)) obtenu empiriquement et le nombre de degré-jour dans la semaine précédente.

Après le stade doubles-rides, aucune autre tige n'est produite et la survie de chaque groupe de talles (cohorte) est calculée à partir du temps thermique accumulé depuis le stade doubles-rides, en faisant les hypothèses que les talles formées les dernières meurent les premières et que le taux de mort des talles est une fonction de la densité en tige. La mort des talles s'arrête à la floraison et on suppose que toutes les tiges vivantes à ce moment là portent des épis.

La survie de chaque cohorte de talles est décrite par une équation à trois paramètres, c'est une fonction inverse du temps thermique depuis le stade doubles-rides. La survie d'une cohorte de talles est inversement proportionnelle au nombre de tiges existant au moment où la cohorte considérée est née.

Le modèle prédit que si la mort des tiges cesse à la floraison, 90% des tiges nées tôt survivront pour produire des épis, alors que les tiges nées vers la fin du tallage ont une faible chance de survie.

Croissance de la feuille

Une relation linéaire empirique (droite de régression) est établie (Baker *et al.*, 1980) entre le taux d'apparition de feuille par degré.jour et le taux de changement de durée du jour à l'émergence de la culture pour une série de culture de blé émergeant à différentes dates. On définit ainsi un temps thermique (degré.jour) entre l'apparition des feuilles successives (appelé intervalle polychron). Cet intervalle varie avec la date d'émergence (exemple 129 deg.jour/feuille pour une émergence le 15 septembre et 98 pour une émergence le 15 décembre). Ce modèle reproduit les observations: le taux d'émergence de feuille est plus rapide pour les cultures semées tardivement.

Un modèle simple décrit l'évolution de la taille des feuilles vertes avec le temps. Après l'émergence, on suppose que la feuille grandit jusqu'à des dimensions finales pré-définies (d'après Gallagher, 1979). La taille finale varie avec la position de la feuille sur la tige et

chaque feuille atteint sa taille maximale en 1,8 phyllochron. La croissance de la feuille est simulée par la description de la croissance des largeur et longueur. Comme les feuilles ne sont pas rectangulaires, les dimensions de la feuille sont ensuite multipliées par une fonction forme. La contribution des épis à la surface active verte n'est pas prise en compte. Lorsque chaque feuille a atteint sa taille optimale, il y a une période pendant laquelle cette taille reste constante, avant que la surface active ne commence à diminuer. Le temps thermique séparant le moment où la feuille atteint sa taille maximale et le moment où la surface active est nulle est proportionnel à l'intervalle phyllochron. Le coefficient de proportionnalité est le même pour les 8 premières feuilles, puis pour les feuilles allant de la neuvième à la dernière feuille.

Les paramètres du modèle

On a besoin de connaître le taux de production de talles en temps thermique et les valeurs des paramètres pour la courbe de survie qui décrit le temps thermique jusqu'à 50% de survie pour chaque cohorte ainsi que le taux de déclin d'une cohorte une fois que la mort de la tige est amorcée.

Dans des conditions optimales (fertilisation azotée et absence de maladies), le taux de production de talles pour le blé d'hiver est de 2,63/(deg.jour) (Thorne and Taylor, 1980). Si l'on a une densité de plants à l'émergence de 250/m², le taux de production de talles donne, sur la base d'un plant, une nouvelle talle tous les 95 deg.jour. Cette valeur est proche du temps thermique entre deux feuilles successives. Ainsi, l'apparition des feuilles et la production de talles sont synchronisées.

Les valeurs pour les paramètres de survie sont obtenues de façon empirique (ajustement à des mesures).

Croissance racinaire

Chaque plante fait 5 racines principales avec un taux de croissance linéaire qui est modifié par la température moyenne quotidienne et la disponibilité en assimilats. Le surplus d'assimilats (restant après l'utilisation pour la croissance des racines principales) fait pousser des racines latérales. 30% des assimilats disponibles sont retenus dans chaque couche, ce qui reste passe à la couche inférieure. Ainsi, la quantité de racines latérales par couche diminue de façon exponentielle avec la profondeur jusqu'à la limite de pénétration des racines principales.

A-4. INTERCEPTION DE LA LUMIERE ET PHOTOSYNTHESE

La quantité de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) arrivant sur chaque m² de culture est calculée à partir des valeurs quotidiennes de rayonnement net incident dans les courtes longueurs d'onde. Ces valeurs sont combinées avec les valeurs de surfaces foliaires vertes (LAI) obtenues à partir du module 'croissance des feuilles et des talles'. On obtient le PAR incident pour chaque heure au centre de chaque couche de feuilles grâce à un modèle d'interception de rayonnement (Charles-Edwards, 1978). La quantité de CO₂ fixée par photosynthèse (par couche et par heure) est calculée. Le taux de photosynthèse varie avec la température. Le résultat total de la photosynthèse produit pendant les heures d'ensoleillement est réduit par les quantités perdues lors de la respiration de croissance et de la respiration de maintenance, on obtient alors la quantité d'assimilats produite quotidiennement.

Interception du rayonnement

L'intensité de PAR est calculée pour chaque niveau du couvert $Q_v(z)$ en W/m².

$$Q_v(z) = (Q_v.k/(1-m)) \exp(-k.LAI(z));$$

Q_v est le PAR au sommet du couvert, $LAI(z)$ est l'indice foliaire vert au niveau de profondeur z , k est le coefficient d'extinction et m la transmittance de la feuille.

Photosynthèse

Le taux de photosynthèse P_g ($\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$), après soustraction de la photorespiration, est obtenu par ajustement (équation quadratique: polynôme de degré 2) à la courbe de réponse photosynthèse/lumière ayant pour paramètre une efficacité photosynthétique et un taux de photosynthèse maximale P_{max} . P_{max} est le rapport de la concentration en CO_2 ambiant et de la résistance totale à la diffusion du CO_2 . Cette résistance totale est la somme de 3 résistances (de la résistance de la couche limite de la culture, de la résistance du mésophylle et de la résistance stomatique). La résistance stomatique dépend de l'état hydrique de la feuille.

Les valeurs de P_g obtenues (après résolution du polynôme) pour chaque unité de couche de surface de feuille et pour chaque heure d'ensoleillement sont sommées pour donner la quantité brute de CO_2 transformée en hydrate de carbone chaque jour.

Correction par la température du taux photosynthétique maximum

Les basses températures limitent le taux photosynthétique maximum à lumière saturante et les concentrations en CO_2 . Le taux de photosynthèse maximum dépendant de la température (P_m) est régi par une loi fonction de la température de la feuille. Ce terme intervient dans l'équation quadratique du taux de photosynthèse.

Respiration

La respiration totale R est calculée quotidiennement comme la somme des respirations de croissance et de maintenance. La respiration de croissance est une fraction des valeurs horaires de la productivité primaire brute (ou photosynthèse brute) P_g cumulée sur les heures d'ensoleillement. P_g s'exprime en CH_2O équivalents ($P_g(\text{CH}_2\text{O}) = 0.65P_g(\text{CO}_2)$).

La respiration de maintenance dépend des températures minimales et maximales, et est proportionnelle au poids total de la culture.

Répartition de la matière sèche et croissance du grain

La productivité primaire nette quotidienne P_n (CH_2O) ($\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$) est la différence entre la production photosynthétique P_g (CH_2O) quotidienne et la respiration R . P_n est répartie entre les racines, les feuilles, les tiges et plus tard les épis. Les proportions de matière sèche allouées aux tiges, feuilles et racines évoluent en fonction du stade phénologique (émergence, doubles-rides, début de croissance de l'épi, floraison, et maturité). Il y a un couplage avec l'évolution du LAI en fonction de la température: par exemple, lorsque pour un jour donné l'incrément de LAI est nul, la quantité de matière sèche allouée aux feuilles est nulle.

La croissance de l'épi précède la floraison, pendant cette croissance, 30% de la quantité nette d'assimilats vont dans les épis. Le nombre de grains par épi est déterminé à partir du poids de l'épi à la floraison (10mg de poids de l'épi équivalent à 1 grain).

La croissance du grain est modélisée en rendant disponibles tous les assimilats nets produits entre la floraison et la maturité, pour la croissance du grain, ainsi qu'un réservoir d'assimilats de 20% du poids des tiges à la floraison (plus un maximum de 0.4% chaque jour où l'on a un déficit hydrique ou azoté, de la floraison à la fin du remplissage du grain). Ce réservoir est utilisé au moment du remplissage du grain, lorsque l'assimilation photosynthétique est nulle, par simple migration d'assimilats. On suppose que le poids de l'ensemble des grains à maturité est égal au poids des épis à la floraison. La période entre la floraison et la maturité divisée en trois périodes de temps thermique qui correspondent à 3 périodes de croissance du grain: l'initiation, la croissance linéaire et la maturation. Pendant la période d'initiation, tous les assimilats nets s'accumulent dans le réservoir. Pendant la période de maturation, le poids du grain n'augmente pas, mais si l'assimilation

nette quotidienne est négative, le grain perd du poids proportionnellement aux autres parties de la plante. Pendant la période linéaire, la croissance du grain a un taux de croissance maximum limité par la température. Le grain grossit au taux maximum sauf s'il y a une limitation par la disponibilité des assimilats quotidiens ou des assimilats du réservoir.

A-5. BILAN HYDRIQUE ET AZOTE

Le modèle

Ce modèle de bilan azoté et hydrique dans le sol est utilisé pour simuler la minéralisation de l'azote organique en ammonium et par la suite de la nitrification en nitrate, ainsi que la distribution de l'eau et de l'azote. Ce modèle suppose que les manques en eau et en azote sont les seuls facteurs qui réduisent le taux de croissance de la culture par rapport à sa potentialité optimale fixée par le rayonnement et la température. Dans le modèle de culture, le pompage d'azote et d'eau peut être limité soit par leur carence respective dans la zone racinaire, soit par la sécheresse du sol, soit par l'incapacité des racines à les absorber. Les carences en eau et/ou en azote sont transposées en facteurs qui affectent le taux auquel les processus s'effectuent dans le couvert, en particulier la croissance des tiges et des feuilles. On suppose que de graves diminutions en eau et en azote affectent directement le processus de fixation du CO₂.

Le modèle de sol simule quotidiennement le mouvement de l'eau et de l'azote à travers un sol divisé en couches et estime quelle quantité est disponible pour la croissance de la culture, pour chaque couche de sol et chaque jour. Le modèle estime les besoins quotidiens en azote et en eau et simule leur pompage ainsi que les effets d'un déficit soit en eau soit en azote sur la croissance de la culture. Les processus d'azote dans le sol sont modifiés par la température et l'humidité du sol. Le sol (2m) est décomposé en 40 couches de 0.05m

d'épaisseur. Les entrées sont le contenu volumétrique en eau de chaque couche pour différents niveaux de pompage (en terme de pression) ainsi que leur valeur au début de la simulation (en fonction de la constitution du sol). L'eau est répartie en une partie qui est mobile entre les couches et une partie qui est retenue par la couche. L'évaporation provenant du sol et de la plante est calculée (équation Penman), la transpiration de la culture est réduite quand le déficit en humidité du sol est supérieur à 65% de l'eau disponible dans le sol dans la zone racinaire.

Le fertilisant est ajouté au niveau de la couche supérieure du sol un jour donné, l'azote est incorporé dans la phase mobile de l'eau. Les couches ayant des contenus en eau mobile supérieurs au niveau de saturation perdent cet excès par un drainage rapide vers le fond du profil. Cette eau traverse l'ensemble du sol et évacue ainsi une quantité d'éléments dissous. La concentration en azote des différents organes diminuent avec l'évolution phénologique.

Les effets sur la culture

Les effets d'un déficit en eau du sol et des concentrations en azote de la culture sont transposés en facteurs qui affectent la croissance et le développement de la culture.

Il y a deux types de limitations causées par un manque d'eau. Les deux facteurs sont calculés grâce au rapport du déficit en eau dans le sol (mm) et de l'eau disponible pour la plante (mm) à partir du profil du sol.

- le premier facteur augmente le taux de vieillissement des feuilles et donc leur sénescence.
 - le second facteur a des effets moins sévères que le précédent. Il diminue l'intervalle en temps thermique entre le moment auquel une feuille atteint sa surface verte maximale et sa sénescence complète, contribuant ainsi à une accélération de la sénescence dans des conditions de sécheresse. Il diminue également le taux d'expansion des surfaces de feuilles.
- Le dernier effet consiste à diminuer la taille du réservoir d'assimilats des feuilles et des

tiges qui apparaît à la floraison et qui est potentiellement disponible pour la croissance du grain.

Enfin, le déficit en eau du sol augmente le poids spécifique de la feuille.

Les effets d'un déficit en azote dans la culture sont modélisés de façon analogue aux effets d'un déficit hydrique. On calcule le rapport entre d'une part la différence des concentrations courantes en azote des tiges et des racines avec les valeurs minimales, et d'autre part, les concentrations en azote maximale moins minimale pour le stade de développement concerné. Les effets d'un déficit sont:

- diminution du temps pendant lequel la production des talles apparaît
- augmentation du taux de mort des talles entre le stade doubles-rides et la floraison
- diminution du taux de croissance de la longueur des feuilles
- réduction du taux maximum de la production de talles
- accélération du vieillissement des feuilles et ainsi de la sénescence
- diminution de la taille du réservoir d'assimilats potentiellement disponibles pour la croissance du grain.

ANNEXE B - MODELES DE TRANSFERT RADIATIF DANS UN COUVERT VEGETAL

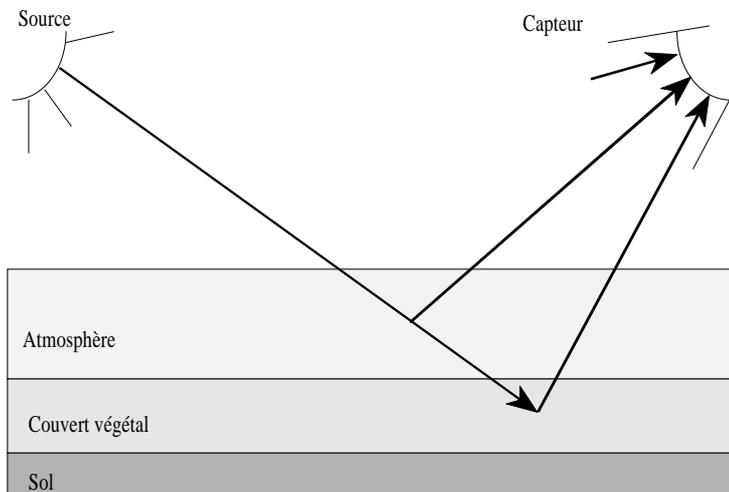
B-1. INTRODUCTION

Lorsque le rayonnement solaire est intercepté par la végétation, il est diffusé et réfléchi. Sa composition spectrale ainsi que sa direction se trouvent modifiées de façon complexe par le couvert végétal. Une partie de cette radiation réfléchie et altérée est interceptée par les capteurs embarqués sur satellites. Afin d'interpréter les quantités obtenues, il faut être capable d'établir une relation entre les réflectances mesurées et les propriétés intrinsèques du couvert observé (Goel, 1988). Les modèles de réflectances représentent un moyen de relier les caractéristiques biophysiques du couvert à la radiation réfléchie en prenant en compte la géométrie des interactions du rayonnement.

L'observation spatiale de la biosphère met donc en jeu les systèmes suivants (Goel, 1988) :

- la **source** du rayonnement, ici le soleil caractérisé par une intensité spectrale et une géométrie de l'éclairement,
- l'**atmosphère** avec en particulier des aérosols, de la vapeur d'eau et de l'ozone. Ces composés sont caractérisés par leur concentration, leurs propriétés diffusantes et absorbantes en fonction de la longueur d'onde,
- le **couvert végétal** caractérisé par les propriétés optiques (réflectance et transmittance) et les paramètres de structure (forme et disposition) de ces composants, et enfin par les conditions d'environnement (température, humidité relative, précipitation, vitesse du vent),
- le **sol** caractérisé par sa réflectance, sa transmittance et son état de surface (rugosité, texture, densité, humidité),

- le **capteur** caractérisé par sa sensibilité spectrale, son ouverture, son étalonnage et la géométrie de visée.



Système de télédétection (Goel et Strelbel, 1983)

Ainsi les quantités mesurées par le capteur évoluent temporellement, spatialement et avec la longueur d'onde à cause de l'intervention des divers paramètres précités.

Il s'agit ici de préciser les méthodes permettant de modéliser la réflectance du couvert en fonction des caractéristiques des différents intervenants (source, capteur, atmosphère, sol et végétation), c'est le *problème direct*.

B-2. CONCEPTS DE BASE

a. Flux solaire incident

Le flux solaire incident possède deux composantes : d'une part le flux direct ou spéculaire, c'est à dire celui qui n'a pas été absorbé ou dispersé par l'atmosphère ; d'autre part le flux diffus, fraction qui a été dispersée vers le bas. La part diffuse du flux incident dépend des conditions atmosphériques et varie avec la longueur d'onde. Alors que la direction du flux direct est donnée par l'angle zénithal solaire, le flux diffus est caractérisé par sa distribution angulaire.

b. Propriétés spectrales des composants du couvert

Lorsque le flux incident arrive au niveau d'un composant du couvert (feuilles, troncs, fleurs...), il subit deux processus : l'absorption et la diffusion qui comprend la réflexion et la transmission à travers l'élément. La réflexion à partir de la feuille (par exemple) comporte deux composantes : la réflexion spéculaire (l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion) et le flux diffus (une fraction est rétrodiffusée : diffusée dans la direction de la source).

La réflectance, la transmittance et l'absorptance évoluent en fonction de la longueur d'onde.

c. Architecture du couvert

Le parcours du flux incident à travers la végétation vers le sol et celui du rayonnement parvenant au capteur ne dépendent pas uniquement des propriétés de diffusion et d'absorption des composants du couvert. En effet, ils sont également sensibles à la densité et à l'orientation des éléments. Au sein du couvert, un élément reçoit deux types de rayonnement : le rayonnement solaire non interceptée par les autres éléments et la radiation interceptée puis diffusée par d'autres éléments.

De la même façon, divers flux parviennent au capteur :

- **simple diffusion** : flux diffusé une seule fois par un élément de végétation,
- **diffusion multiple** : flux diffusé à diverses reprises par plusieurs éléments, mais qui n'atteint pas le sol,
- **flux réfléchi par le sol** et parvenant au capteur sans avoir été intercepté par un élément ou ayant été intercepté puis diffusé dans la direction du capteur.

L'architecture du couvert sera décrite par la distribution spatiale de la végétation sur le sol, puis par la densité et l'orientation des éléments au sein du couvert. Si le couvert est homogène, la densité est caractérisée par l'**indice foliaire** (LAI). C'est un paramètre

important du couvert, il intervient dans les modèles pour l'évaluation de la croissance de la plante et de l'évapotranspiration, et il est relié à la biomasse. La **distribution angulaire des feuilles** (ALA) dépend du type de couvert, les principales distributions théoriques utilisées (Bunnik, 1978) sont reportées dans le tableau.

type de couvert	f(q)	ALA
planophile	$2(1+\cos 2q)/p$	26.76
erectophile	$2(1-\cos 2q)/p$	63.24
plagiophile	$2(1-\cos 4q)/p$	45.00
extremophile	$2(1+\cos 4q)/p$	45.00
uniforme	$2/p$	45.00
sphérique	$\sin q$	57.30

f(q) : distribution angulaire des feuilles,
q : angle en degré entre l'axe de la feuille et le plan horizontal,
ALA : angle moyen d'inclinaison des feuilles,

Les effets des paramètres d'architecture sur la réflectance du couvert

En ce qui concerne les effets de l'indice foliaire, ils dépendent de la longueur d'onde considérée. Dans le visible, la plupart de la lumière incidente est absorbée, donc si le nombre de feuilles augmente, c'est à dire si le LAI augmente, de plus en plus de radiation incidente sera absorbée par la végétation. Lorsque l'indice foliaire atteint une certaine valeur (2 ou 3), la plupart de la radiation incidente est absorbée, donc augmenter l'indice foliaire n'augmente plus la réflectance. Dans le proche infrarouge, l'absorption est faible, donc si IF augmente, la diffusion devient plus importante et ainsi la réflectance augmente (de façon exponentielle) jusqu'à une valeur de saturation.

La distribution foliaire a également un impact important sur la fonction de distribution de la réflectance. Le phénomène le plus important apparaît lorsque le soleil se trouve derrière le capteur. En effet, dans cette configuration, une très grande proportion des éléments directement illuminés sera observée : c'est l'effet hot-spot. L'amplitude de ce phénomène

dépend du LAD et de la taille des feuilles. De plus, la distribution foliaire intervient directement sur la probabilité de "trous" à travers le couvert entier. Notons enfin l'impact de l'arrangement spatial de la "sous-canopée" au sol sur la réflectance bidirectionnelle qui conditionne la fraction du sol illuminée par un faisceau incident non-intercepté, ou encore la part mesurée de rayonnement réfléchi par le sol.

d. Diffusion du sol

Tout comme la végétation, le sol absorbe et disperse (réfléchi) le flux incident. La plupart des modèles considère le sol comme un système lambertien (hypothèse valide si la rugosité n'est pas trop importante). La réflectance hémisphérique varie avec la longueur d'onde.

Dans le cas d'une végétation dense, l'impact du sol est négligeable car une très faible proportion du flux incident atteint le sol. En revanche, si le couvert est clairsemé, l'influence du sol devient tout particulièrement importante pour les visées proches du Nadir et dans la direction du hot-spot.

B-3. INTERACTIONS DE L'ONDE ELECTROMAGNETIQUE AVEC LA VEGETATION

Le couvert végétal est un système relativement complexe, les interactions entre ses éléments et l'onde électromagnétique sont multiples. Il est donc difficile de résoudre directement les équations de Maxwell qui régissent ces interactions. Selon Goel (1988), il existe essentiellement quatre approches permettant de modéliser le transfert radiatif au sein du couvert végétal.

a. Les diverses approches

- les modèles géométriques

Le couvert est composé d'une surface (sol de réflectance donnée) sur laquelle sont disposés de façon précise des objets géométriques (de forme, dimension et propriétés optiques

connues). Ces modèles sont particulièrement adaptés aux couverts clairsemés (la diffusion multiple peut être négligée) à de faibles angles solaires (les ombres mutuelles des objets sont négligées).

- les modèles de milieu turbide

Les éléments du couvert sont de petites particules absorbantes et diffusantes (de propriétés optiques et de direction données) distribuées aléatoirement dans des couches horizontales. L'architecture du milieu est caractérisée par l'indice foliaire et la distribution angulaire des feuilles. On néglige ici la taille des feuilles, la distance qui les sépare et leur distribution sur le plan horizontal.

Ces modèles sont utilisés pour des couverts denses constitués d'éléments de petite taille par rapport à la hauteur du couvert.

- les modèles hybrides

Les éléments de forme géométrique définie sont également des particules diffusantes et absorbantes, mais ici la diffusion multiple n'est plus négligée. Ces modèles de forme très complexes permettent de traiter le cas des couverts ni denses ni clairsemés.

- les modèles de simulation numérique

Chaque élément est défini par un ensemble de surfaces. Le trajet d'un faisceau lumineux à travers le couvert est déterminé par la méthode de Monte Carlo. Ces modèles demandent des moyens informatiques importants mais ils permettent d'envisager plusieurs configurations concernant la taille et la disposition des éléments.

b. La théorie du transfert radiatif

L'équation de base

Le noyau de cette théorie est l'équation de transfert radiatif de base (Chandrasekhar, 1950), équation intégro-différentielle. Pour une radiation non polarisée, elle s'exprime ainsi :

$$\partial I(\mathbf{t};\mathbf{s})/\partial t = -I(\mathbf{t};\mathbf{s}) + (1/4\pi) \int p(\mathbf{s},\mathbf{s}') I(\mathbf{t};\mathbf{s}') d\omega' + \varepsilon(\mathbf{r},\mathbf{s})/\sigma\rho$$

avec

I : luminance à la position \mathbf{r} et dans la direction \mathbf{s} , en $\text{W.m}^{-1}.\text{st}^{-1}.\text{hz}^{-1}$,

ρ : nombre de particules par unité de volume avec lequel le rayon incident interagit,

σ : somme des sections efficaces d'absorption et de diffusion des particules,

$d\omega'$: élément d'angle solide, l'intégration sur ω' permet la prise en compte de toutes les directions \mathbf{s}' ,

$p(\mathbf{s}, \mathbf{s}')$: fonction de phase,

t : épaisseur optique,

ε : émission provenant du couvert.

La fonction de phase est la probabilité pour que la luminance dans la direction \mathbf{s}' , soit diffusée dans un angle solide de direction \mathbf{s} .

L'approximation à deux flux de Kubelka et Munk (1931)

Ces auteurs décrivent les transferts radiatifs dans un milieu diffusant, isotrope, homogène et unidimensionnel où seuls les flux diffus ascendants et descendants sont considérés, au moyen du système d'équation suivant :

$$dE^-/dn = -\infty E^- - \gamma E^+$$

$$dE^+/dn = -\infty E^+ + \gamma E^-$$

avec :

E^- : flux diffus descendant,

E^+ : flux diffus ascendant,

n : indice foliaire,

∞ : coefficient d'atténuation diffuse,

γ : coefficient de diffusion.

L'atténuation des différents flux est traitée selon la loi de Beer-Lambert. Cette théorie à deux flux s'exprime grâce à deux équations différentielles linéaires à deux coefficients.

Le flux diffus est donc la somme de deux flux monochromatiques E^+ et E^- selon les directions descendantes et ascendantes perpendiculaires à la surface de symétrie du milieu.

Les variations des flux diffus sont caractérisées par les paramètres ∞ et γ .

L'approximation à trois flux de Duntley (1942)

L'auteur introduit une troisième équation différentielle pour décrire la pénétration du flux directionnel c'est à dire le flux descendant selon la direction d'éclairement F^- . Le système d'équation devient :

$$dE^-/dn = \alpha E^- - \gamma E^+ - s_1 F^-$$

$$dE^+/dn = -\alpha E^+ + \gamma E^- + s_2 F^-$$

$$dF^-/dn = \kappa F^-$$

avec :

F^- : flux solaire direct (non intercepté),

s_1 : coefficient de diffusion vers l'avant pour le flux solaire direct,

s_2 : coefficient de rétrodiffusion pour le flux solaire direct,

κ : coefficient d'extinction (absorption) pour le flux solaire direct.

On possède alors une théorie à trois flux, trois équations (appelées équations de Duntley) et cinq paramètres. Ce formalisme sera utilisé par Allen et al. (1970) pour la mise au point du modèle de réflectance AGR.

L'approximation à quatre flux

Une quatrième équation permet de décrire le flux spéculaire ascendant F^+ , on obtient finalement :

$$dE^-/d(-t) = -(\alpha + \gamma)E^- + \gamma E^+ + S_1 F^- + S_2 F^+$$

$$dE^+/dt = -(\alpha + \gamma)E^+ + \gamma E^- + S_1 F^+ + S_2 F^-$$

$$dF^-/d(-t) = -(\kappa + S_1 + S_2)F^-$$

$$dF^+/dt = -(\kappa + S_1 + S_2)F^+$$

avec :

F^+ : flux spéculaire ascendant,

α : coefficient d'absorption,

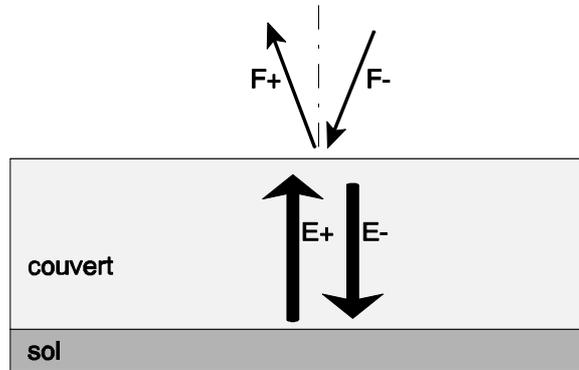
γ : coefficient de diffusion,

S_1 : coefficient de diffusion hémisphérique vers l'avant,

S_2 : coefficient de diffusion hémisphérique vers l'arrière,

κ : coefficient d'absorption pour le flux solaire direct

Les variations du flux solaire direct et du flux spéculaire sont décrites à l'aide des paramètres κ , S1 et S2.



Cette dernière étape aboutit à une théorie à quatre flux, décrite par quatre équations différentielles et possédant neuf paramètres. Ces quatre expressions sont des équations différentielles linéaires, leur résolution permet donc la détermination du flux en tout point du couvert. Notons cependant que cette formulation exclut totalement les effets liés à la polarisation qui se révèlent importants dans le cas de feuilles cireuses (forte réflexion spéculaire).

Suits (1972) développera un des premiers modèles turbides en reliant les paramètres des équations de Duntley aux caractéristiques de la structure du couvert et en ajoutant à la théorie à trois flux, une équation associée aux rayonnement dans la direction de l'observation.

La théorie de Kunbelka et Munk est ainsi à la base de nombreux modèles de transfert radiatif.

B-4. UN MODELE SIMPLIFIE DE REFLECTANCE ET D'ABSORPTANCE D'UN COUVERT VEGETAL (Baret, 1988)

a. Introduction

Un modèle simplifié donnant le facteur de réflectance d'un couvert végétal pour des visées verticales est présenté. Il est basé sur un formalisme de type loi de Beer. Il prend en compte explicitement les variables caractéristiques de la géométrie du couvert, et des propriétés optiques de ses éléments, ainsi que la position du soleil.

Le modèle reproduit correctement les données qui sont obtenues à partir du modèle de Suits sur lequel il a été ajusté. Son formalisme simplifié permet une interprétation claire de la réponse spectrale du couvert en termes d'amplitude et de vitesse de variation de la réflectance en fonction de l'indice foliaire. Il permet enfin de relier aisément la réflectance directionnelle dans différents domaines spectraux.

La réponse radiométrique d'une culture dépend de 3 caractéristiques principales du couvert:

- l'indice foliaire
- l'orientation des feuilles
- les propriétés optiques des feuilles

Mais elle dépend aussi de paramètres externes au couvert comme l'angle de visée, la position du soleil, et également les propriétés optiques du sol sous-jacent qui sont liées à son état de surface (humidité, rugosité).

L'expérimentation ne permet d'analyser que très partiellement l'effet de ces différents facteurs sur la réponse radiométrique des couverts végétaux. C'est pourquoi de nombreux modèles analytiques de réflectance ont été développés. Mais ils sont le plus souvent complexes et nécessitent parfois des temps de calcul importants.

Ces modèles constituent de précieux outils d'analyse et de compréhension de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec le couvert végétal, mais ne permettent pas des applications courantes. Seuls des modèles très simples du type 'indice de végétation' sont utilisés actuellement. Mais cette simplification extrême ne permet pas de prendre en compte explicitement les principales variables liant les caractéristiques du couvert aux données radiométriques.

Le modèle de Baret est un modèle simple de réflectance directionnelle verticale qui permet de prendre en compte explicitement l'effet des différentes variables évoquées précédemment.

b. Choix de la forme du modèle de réflectance

Les données expérimentales (Tucker, 1977; Ripple, 1985) ainsi que les simulations de modèles de réflectance (Bunnik, 1978) montrent que la réflectance bidirectionnelle d'un couvert végétal varie de façon exponentielle avec son indice foliaire. Cette variation pour un jeu donné des variables externes au couvert et une géométrie donnée de celui-ci est comprise entre deux limites :

- la réflectance du sol nu (quand l'indice foliaire est nul),
- la réflectance infinie qui correspond à la valeur asymptotique atteinte lorsque l'indice foliaire tend vers l'infini.

Le formalisme choisi est du type "cinétique monomoléculaire" que l'on peut écrire sous la forme :

$$r_c = r_{inf} + (r_s - r_{inf})\exp(-K_r \cdot LAI) \quad (1)$$

avec:

r_c : réflectance de la culture

rinf : réflectance infinie de la culture
rs : réflectance du sol nu
Kr : coefficient d'atténuation de la réflectance
LAI : indice foliaire de la culture

Ce formalisme simple a été proposé par Allen et Richardson (1968) puis Kumar et Monteith (1981) et Park et Deering (1982) dans le cas d'un modèle de réflectance ne prenant en compte que des flux diffus. La résolution des équations différentielles du transfert radiatif de Kubelka et Munk (1931) aboutit à une expression du LAI fonction de (Kr, rc, rinf, rs).

Dans le domaine du visible, on peut négliger les doubles produits (rc.rinf) et (rs.rinf) devant 1 compte tenu des faibles valeurs de rc, rs et rinf. L'expression devient donc équivalente à l'équation (1). Chance (1981), Dausat (1985) et Clevers (1986) ont appliqué ce type de formalisme (1) à la réflectance directionnelle dans le domaine du visible et infrarouge. Mais la dépendance des paramètres rinf et Kr vis-à-vis des propriétés optiques des feuilles (réflectance Rf, transmittance Tf), de l'inclinaison des feuilles (θ_l) ainsi que la position du soleil (θ_s) n'a pas été analysée. L'objectif ici est de proposer des relations permettant de décrire le déterminisme de rinf et Kr en fonction des variables Rf, Tf, θ_l , θ_s

c. Signification des paramètres rinf, Kr

Les variables LAI et rs interviennent explicitement dans le modèle (1) alors que les variables Rf, Tf, θ_l , θ_s n'interviennent que par l'intermédiaire des paramètres rinf(Rf, Tf, θ_l , θ_s) et Kr(Rf, Tf, θ_l , θ_s). Les paramètres rinf et Kr ne sont pas clairement définis. Les valeurs de 2 paramètres rinf et Kr ont été déterminées par ajustement non linéaire du modèle (1) à des simulations du modèle analytique de Suits (1972) pour différentes combinaisons des variables LAI et rs et pour différents jeux des variables Rf, Tf, θ_l et θ_s . Les paramètres rinf et Kr sont alors reliés par simple ajustement polynomial de degré

inférieur à 3, aux variables R_f , T_f , θ_l , θ_s . Pour cela l'auteur a procédé en deux temps en étudiant successivement :

- l'influence des propriétés optiques des feuilles sur r_{inf} et k_r ,
- l'influence de l'inclinaison des feuilles (θ_l) et de la position du soleil (θ_s).

Soit V le vecteur des paramètres :

$$V(R_f, T_f, \theta_l, \theta_s) = \begin{pmatrix} r_{inf}(R_f, T_f, \theta_l, \theta_s) \\ K_r(R_f, T_f, \theta_l, \theta_s) \end{pmatrix}$$

V doit tendre asymptotiquement vers 0 pour certaines configurations particulières (visée verticale, feuilles verticales, soleil vertical). Un domaine spectral de référence est choisi, et défini par les propriétés optiques des feuilles dans ce domaine. Ces contraintes permettent de relier (par ajustement polynomial) la valeur des paramètres r_{inf} et K_r correspondant à une situation caractérisée par un couple (θ_l, θ_s) dans un domaine spectral particulier (R_f, T_f) aux valeurs de ces mêmes paramètres dans un autre domaine spectral. Ces relations sont univoques et indépendantes des variables θ_l et θ_s .

La réflectance directionnelle infinie, r_{inf} , diminue d'autant plus rapidement que les feuilles sont verticales. La sensibilité est très importante pour des inclinaisons foliaires supérieures à 60° . Elle diminue aussi régulièrement quand l'angle zénithal solaire augmente car la proportion de parties ombrées augmente, contribuant à faire décroître la réflectance.

K_r augmente d'autant plus avec l'angle zénithal solaire que le soleil est bas sur l'horizon ; il augmente très faiblement avec l'inclinaison foliaire jusqu'à un maximum atteint pour des angles compris entre 30 et 50° , puis diminue quand les feuilles sont plus proches de la verticale.

Les résultats de ce modèle simple ont été comparés à ceux de modèles analytiques plus complexes (Suits).

d. Conclusion

Le formalisme simplifié proposé permet une interprétation claire de la réponse spectrale du couvert en fonction de l'indice foliaire et de la réflectance du sol nu. Ce modèle simplifié nécessite 2 paramètres qui peuvent s'exprimer simplement en fonction des propriétés optiques des feuilles, de l'inclinaison des feuilles et de l'angle du soleil. r_{inf} détermine l'amplitude de variation et K_r est lié à la sensibilité de la réponse à l'indice foliaire et aux propriétés optiques du sol.

Ce modèle simplifié est fidèle aux résultats de modèles analytiques plus complexes dont il est dérivé. Il est subordonné aux hypothèses du modèle originel, pour une strate homogène et ne comportant qu'un seul type de composants, c'est à dire :

- il n'existe pas de superpositions privilégiées,
- l'orientation foliaire est caractérisée par :
 - sa projection sur les plans verticaux et horizontaux,
 - une distribution uniforme des azimuts
- les éléments et le sol sont lambertiens.

B-5. LE MODELE SAIL

Verhoef (1984) propose une généralisation du modèle de Suits (à quatre équations et neuf paramètres) en développant le modèle SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves). L'orientation des feuilles est ici décrite par une fonction discrète de distribution des angles d'inclinaison foliaire (Leaf Inclinaison Density Function ou LIDF). Le modèle de Suits devient ainsi un cas particulier du modèle de Verhoef puisqu'il considère deux classes d'angles d'inclinaison des feuilles (verticales ou horizontales).

a. Description analytique du modèle

$$dE^-/dz = aE^- - \sigma E^+ - sE_s$$

$$dE^+/dz = -aE^+ + \sigma E^- + s'E_s$$

$$dE_s/dz = kE_s$$

$$dE_o/dz = uE^+ + vE^- + wE_s - KE_o$$

avec :

E^- , E^+ : flux diffus respectivement descendant et ascendant,

E_s : flux solaire direct,

E_o : flux ascendant selon la direction d'observation,

z : profondeur,

a : coefficient d'extinction des flux diffus (absorption et diffusion arrière),

σ : coefficient de diffusion arrière des flux diffus,

s , s' : coefficient de diffusion du flux E_s respectivement vers l'avant et vers l'arrière,

k , K : coefficient d'extinction respectivement relatifs à E_s et à E_o ,

u , v , w : coefficient de diffusion vers l'avant de E^+ selon E_o , vers l'arrière de E^- selon E_o et vers l'arrière de E_s selon E_o .

Les neuf paramètres ($a, \sigma, s, s', k, K, u, v, w$) de ce modèle à quatre flux dépendent des angles zénithaux (θ_l) et azimutaux (ϕ_l) des normales des faces supérieures des feuilles. La distribution azimutale des feuilles est supposée aléatoire.

b. Morphologie du couvert

La morphologie idéale d'une couche de végétation selon Verhoef suppose les hypothèses suivantes :

- la couche est horizontale et infiniment étendue,
- le couvert est composé d'un seul type d'élément : de petites feuilles plates,
- la couche est homogène.

Elle est décrite grâce à deux paramètres :

- la distribution angulaire des feuilles (LAD), soit $f(\theta_l)$,
- la densité de l'indice foliaire (L') avec $L' = IF/h$

où h est la hauteur du couvert.

Verhoef effectue une approximation concernant la distribution angulaire des feuilles en considérant un nombre fini d'inclinaisons. Il choisit 13 inclinaisons θ_l situées au centre des intervalles $[0,10]$, ..., $[70,80]$, $[80,82]$, ..., $[88,90]$. Une subdivision plus fine de l'intervalle $[80,90]$ est réalisée car les coefficients K , u , v , w sont très sensibles aux variations du LAD au voisinage du nadir.

c. Les paramètres d'entrée du modèle (pour une longueur d'onde donnée)

1. caractéristiques du couvert

- les propriétés optiques des feuilles :

* le coefficient de réflexion hémisphérique de la feuille (ρ),

* le coefficient de transmission hémisphérique de la feuille (τ),

- les paramètres de morphologie du couvert :

* l'indice foliaire (IF ou LAI),

* la fonction discrète de distribution des fréquences d'inclinaison des feuilles LIDF,

2. paramètres externes au couvert

- la géométrie de l'éclairement et de la visée :

* angle zénithal solaire θ_s ,

* angle zénithal d'observation θ_o ,

* azimut relatif $\psi = |\phi_s - \phi_o|$,

- la réflectance hémisphérique du sol ρ_s ,

Remarque : Les paramètres "réels" du modèle sont ρ , τ , ρ_s , LAI, ALA et SKYL.

L'angle foliaire moyen (ALA) est approximé par sommation discrète sur les intervalles angulaires en fonction de la fréquence d'inclinaison des feuilles $F(\theta_l)$ à θ_l (cas d'une symétrie azimutale aléatoire).

$$ALA = \sum_{i=1}^{13} \theta_{l_i} \cdot F(\theta_{l_i})$$

La fraction du flux solaire incident diffus qui a été dispersée vers le bas (SKYL) est calculée à partir de la constante solaire.

d. Le calcul des neuf coefficients

Les coefficients d'extinction et de diffusion sont établis pour chaque angle d'inclinaison des feuilles (θ_l) en fonction des deux paramètres morphologiques et des flux diffus et incident. Afin de les intégrer au sein des équations de transfert radiatif, il est nécessaire de définir les surfaces relatives pour chacun des flux E_s , E_o , E^+ et E^- , c'est à dire les facteurs angulaires. 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). La formulation finale des neuf coefficients est complexe (Verhoef, 1984 et Goel, 1988) et ne sera pas présentée ici.

e. Calcul de la réflectance du couvert mono-couche

En l'absence de diffusion multiple, la réflectance d'un couvert composé d'une seule couche s'exprime :

$$R = R_s + R_d + R_{soil}$$

avec :

R_s : contribution du flux direct incident (flux solaire) à la réflectance du couvert. C'est la réflexion directe, le rayonnement solaire est diffusé une seule fois,

R_d : contribution du flux diffus à la réflectance totale,

R_{soil} : contribution de la composante directe du flux diffusé par le sol, à la réflectance du couvert.

remarque : Le flux diffusé par le sol, puis par la végétation intervient dans R_d .

Chaque composante est exprimée en fonction des flux (direct ou diffus) et de termes de probabilités pour qu'un élément de végétation soit éclairé ou observé. Ces termes sont des fonctions exponentielles de la profondeur considérée multipliée par un coefficient d'extinction.

Notons que le phénomène du "Hot-Spot", lié à la rétrodiffusion, est traité de façon particulière. Lorsque la direction d'observation est identique à la direction du flux solaire incident ($\theta_s = \theta_o$, $\phi_s = \phi_o$), le terme de probabilité conjointe sera modifié car les probabilités pour qu'un élément en z soit éclairé et observé ne sont plus indépendantes.

Ainsi le modèle SAIL autorise le calcul des quatre flux pour une distribution donnée des angles d'inclinaison des feuilles, qui permet d'aboutir à une expression de la réflectance modélisée du couvert. Le modèle SAIL est une version améliorée du modèle de Suits. En effet, la prise en compte des fonctions de distribution des angles des feuilles permet un calcul plus réaliste des coefficients d'extinction et de diffusion.

f. Le modèle Suits (1972)

Il s'agit d'un modèle analytique de réflectance directionnelle dans la direction d'observation en fonction des paramètres du couvert et des conditions de mesure.

Ce modèle est une extension du modèle AGR (Allen et al., 1970), à son tour issu de la théorie de Kubelka-Munk (1931) qui décrit la dispersion et l'extinction de la lumière en milieu diffusant. C'est le premier modèle analytique qui prend en considération la géométrie de l'éclairement, celle de la visée et les paramètres de la végétation. Les éléments végétaux sont ici schématisés par leurs projections sur les plans verticaux et

horizontaux. On peut alors calculer l'éclairement reçu par chaque feuille, qui deviendra une source répondant à la loi de Beer-Lambert. Le flux dans la direction de visée est la somme des contributions de chaque source au flux ascendant dans cette direction (sans interception). Ces contributions sont appréhendées par la notion de "probabilité de trous". Suits a ainsi obtenu le premier modèle de réflectance directionnelle.

Le système d'équation décrivant cette théorie (pour un couvert dense) est le suivant :

$$dE^-/dz = aE^- - bE^+ - c'E_s$$

$$dE^+/dz = -aE^+ + bE^- + cE_s$$

$$dE_s/dz = kE_s$$

$$dE_o/dz = uE^+ + vE^- + wE_s - KE_o$$

avec :

E^- , E^+ : flux diffus respectivement descendant et ascendant,

E_s : flux solaire direct,

E_o : flux ascendant selon la direction d'observation,

z : profondeur,

a : coefficient d'extinction des flux diffus (absorption et diffusion arrière),

b : coefficient de diffusion arrière des flux diffus,

c' , c : coefficient de diffusion du flux E_s respectivement vers l'avant et vers l'arrière,

k , K : coefficient d'extinction respectivement relatifs à E_s et à E_o ,

u , v , w : coefficient de diffusion vers l'avant de E^+ selon E_o , vers l'arrière de E^- selon E_o et vers l'arrière de E_s selon E_o .

Les hypothèses du modèle de Suits sont les suivantes :

- les éléments du couvert et le sol sont des diffuseurs lambertiens,
- il n'y a pas de superposition privilégiée des feuilles,
- l'orientation foliaire est caractérisée par :
 - * des feuilles sans azimuth privilégié (distribution uniforme des azimuths),
 - * l'inclinaison des feuilles est caractérisée par un angle moyen (feuilles représentées par leur projection sur les plans horizontaux et verticaux).

Ce formalisme autorise la décomposition de la culture en plusieurs strates homogènes. Ces couches sont composées d'éléments d'orientation et de propriétés optiques propres à la strate considérée. Enfin les paramètres caractérisant la structure du couvert sont intégrés à travers les neuf coefficients du modèle.

B-7. LE MODELE DE REFLECTANCE EXTRAD (Goudriaan, 1977)

De Wit a initialement développé un modèle pour simuler la photosynthèse des cultures (1965), qui a ensuite été utilisé par Idso (1970) pour simuler les variations de réflectance diurne sur une culture de maïs.

Goudriaan a alors étendu et amélioré le modèle Idso-de Wit grâce à une description du profil du flux radiatif à l'intérieur du couvert (Goel, 1988 et Bunnik, 1978). Ainsi, le modèle EXTRAD (EXTinction of RADiation) a été développé en 1977 pour calculer le profil du rayonnement solaire au sein d'une culture.

a. Hypothèses de base

- les feuilles sont des diffuseurs lambertiens,
- la géométrie du couvert possède les propriétés suivantes :
 - * la distribution des feuilles est uniforme,
 - * le couvert est subdivisé en couches horizontales infiniment étendues,
 - * critère de détermination du nombre de sous-couches n (Monsi et Saeki) : dans une telle couche les ombres mutuelles des feuilles peuvent être négligées,
 - * la distribution d'angle foliaire est définie sur 9 intervalles angulaires répartis de 0° à 90° ,
 - * l'orientation azimutale des feuilles est aléatoire,

- * le flux diffus, au sein du couvert, divisé en deux flux dans les hémisphères supérieures et inférieures, est calculé en utilisant une distribution sur 9 zones dans chaque hémisphère,
- le rayonnement incident :
 - * le rayonnement incident est subdivisé en un flux solaire direct et un rayonnement diffus (sky) provenant de 9 zones équivalentes de l'hémisphère supérieure,
 - * distribution uniforme du rayonnement diffus (sky) : la luminance du ciel est constante sur l'hémisphère.

b. Les paramètres d'entrée du modèle

1. les caractéristiques du couvert
 - l'indice foliaire LAI,
 - le coefficient de diffusion d'une feuille σ ,
 - la fonction de distribution des angles foliaires $F(k)$, k étant un intervalle d'inclinaison angulaire,
2. les paramètres externes au couvert
 - le coefficient de réflexion hémisphérique du sol ρ_s ,
 - les paramètres d'éclairement :
 - * l'angle d'élévation solaire,
 - * la fraction diffuse du flux solaire incident (fraction diffuse sky irradiance).

c. Description analytique du modèle

Ce modèle est basé sur le calcul du profil du flux radiatif dans le couvert végétal. L'extinction du flux solaire direct s'exprime par une exponentielle décroissante en fonction de l'indice foliaire (affecté d'un coefficient d'extinction).

Le couvert est divisé en un nombre fini n de couches et le rayonnement à un niveau donné du couvert est décomposé en un flux ascendant et un flux descendant. Chacun des flux sera ensuite découpé en un nombre fini (9) d'intensités et de zones contiguës de l'hémisphère.

Pour les besoins de la démonstration, on considère deux couches successives j et $j+1$.

expression de la quantité de flux intercepté dans une couche :

Le taux de flux intercepté $I_t(i,j)$, dans une couche j , est défini comme l'interception du rayonnement incident provenant de toutes les directions k , par la fraction de feuilles $F(i)$ de cette couche.

$$I_t(i,j) = \sum_{k=1}^9 M_i(k, i) \cdot [\phi_d(k, j) + \phi_u(k, j+1)] \quad (1)$$

expression du transfert radiatif dans les neuf directions :

$$\phi_d(k, j+1) = M_t(k) \cdot \phi_d(k, j) + 0.5\sigma \cdot B(k) \cdot \sum_{i=1}^9 M_i(i) \cdot [\phi_d(i, j) + \phi_u(i, j+1)] \quad k = 1, 2, \dots, 9 \quad (2a)$$

$$\phi_u(k, j) = M_t(k) \cdot \phi_u(k, j+1) + 0.5\sigma \cdot B(k) \cdot \sum_{i=1}^9 M_i(i) \cdot [\phi_d(i, j) + \phi_u(i, j+1)] \quad k = 1, 2, \dots, 9 \quad (2b)$$

avec :

$\phi_d(\mathbf{k}, \mathbf{j})$, $\phi_u(\mathbf{k}, \mathbf{j})$: densité de flux des rayonnements diffus respectivement descendant et ascendant au niveau de la couche j et dans la direction k ,

σ : coefficient de diffusion des feuilles,

$M_t(\mathbf{k})$, $M_i(\mathbf{k})$: respectivement les probabilités de pénétration et d'interception du rayonnement d'inclinaison k lorsqu'il traverse une sous-couche,

$B(\mathbf{k})$: distribution zonale du rayonnement diffusé par une couche.

Remarque : Les variations azimutales du rayonnement sont négligées (contrairement aux composantes zénithales).

signification des paramètres σ , $M_t(k)$, $M_i(k)$, $B(k)$:

* le coefficient de diffusion

$$\sigma = \rho + \tau \quad (3)$$

ρ et τ sont respectivement les coefficients de réflexion et de transmission des feuilles.

Remarque : dans le système d'équation (2), on suppose $\rho = \tau = \sigma / 2$

* les probabilités de pénétration et d'interception

$$M_i(k) = S.OP(k) / \sin(k) \quad \text{avec } S = LAI / n, \quad (4a)$$

$$M_t(k) = 1 - M_i(k) \quad (4b)$$

avec :

OP(k) : projection des feuilles à l'intérieur d'une couche sur la direction k.

* distribution zonale du rayonnement diffusé

$$B(k) = B_u(k).M_i(k) / S \quad \text{avec } B_u = 2.\Delta k.\sin(k).\cos(k), \quad (5)$$

avec :

B_u : distribution zonale du rayonnement réfléchi par un réflecteur lambertien,

Δk : intervalle d'angle d'inclinaison (ici 10° car l'hémisphère est divisé en 9 zones discrètes).

conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées correspondent pour l'une à l'intensité du rayonnement total incident au sommet du couvert, pour l'autre à la surface du sol ρ_s . Le sol est considéré comme une surface lambertienne, ainsi la distribution du rayonnement réfléchi dans les neuf directions est décrite par B_u .

flux ascendant au niveau du sol :

$$\phi_u(k, n+1) = \rho_s.B_u(k).\sum_{k=1}^9 \phi_d(k, n+1) \quad (6)$$

méthode de relaxation

Cette technique est une procédure itérative permettant de résoudre les deux équations décrivant le transfert du rayonnement dans le couvert et ainsi de calculer le profil radiatif. La radiation incidente est décomposée en neuf quantités représentant chacune l'intensité provenant d'un intervalle angulaire donné.

Dans un premier temps, on considère que les feuilles sont noires en substituant $\sigma = 0$ dans (2). Une seule série de calcul, d'abord vers le bas, puis vers le haut, donne une bonne approximation du profil radiatif. Ensuite, le calcul est repris à partir de la première couche mais en tenant compte des termes de diffusion. La procédure est répétée plusieurs fois dans les deux directions (montante et descendante), la convergence vers les limites des flux ϕ_d et ϕ_u pour chaque couche est rapide.

Le coefficient directionnel de réflectance (c'est à dire la réflectance du couvert) dans une direction donnée est issu de la luminance totale quittant la couche supérieure du couvert, dans cette direction.

B-8. UN MODELE DE REFLECTANCE POUR UN COUVERT VEGETAL HOMOGENE (Nilson and Kuusk, 1989)

a. Introduction

Un modèle de réflectance analytique pour un couvert végétal statistiquement homogène a été développé. Les caractéristiques spécifiques au modèle sont:

- considérer à la fois les diffusions simples et multiples du rayonnement dans le couvert et dans le sol,
- prendre en compte la réflexion spéculaire sur les feuilles et le Hot Spot du couvert.

b. Modèle de réflectance

On divise la réflectance bidirectionnelle du couvert végétal en la somme de 3 composantes:

$$\rho_1 = \rho_c^1 + \rho_s^1 + \rho^{\text{mult}} \quad (1)$$

ρ_c^1 : réflectance de la diffusion au premier ordre des éléments du couvert,

ρ_s^1 : réflectance au premier ordre provenant du sol,

ρ^{mult} : part de la réflectance du couvert causée par la diffusion multiple sur les éléments du feuillage et du sol.

Une expression analytique approximée de ces 3 composantes sera donnée.

La morphologie de la couche de couvert s'exprime par les caractéristiques suivantes :

- la couche de couvert est homogène horizontalement et infiniment étendue,
- les phytoéléments (feuilles) sont des plateaux minces avec une dimension linéaire moyenne, avec des coefficients de réflexion diffuse (lambertienne) R_D et de transmission T et avec un indice de réfraction n pour décrire leur réflectance spéculaire,
- l'orientation de la surface de feuille est décrite par la densité de distribution des normales aux feuilles, où la distribution azimutale est supposée uniforme,
- la distribution verticale des phytoéléments est décrite par la densité de volume de surface de feuille; il n'y a pas de corrélation entre la localisation des feuilles aux différentes hauteurs. L'intégration de cette densité sur la hauteur du couvert donne le LAI.

Diffusion simple des éléments du couvert

La réflectance du couvert due à la diffusion au premier ordre des éléments du couvert est donnée par une intégrale sur la profondeur. Interviennent la fonction de phase de diffusion du milieu, la probabilité conjointe de lignes de vues libres existantes à une profondeur donnée de la canopée dans une direction du soleil et une direction d'observation données.

La probabilité conjointe est le produit de la probabilité de trous dans la direction du soleil et de la probabilité de trous dans la direction de l'observateur puis d'un terme correctif pour le Hot Spot. La probabilité de trous fait intervenir une fonction d'orientation de surfaces foliaires (la projection moyenne d'une surface foliaire unité à un niveau donné et à une profondeur donnée). Dans les couverts végétaux réels, les probabilités de trous dans la direction du soleil et de l'observateur sont en partie dépendantes, ceci étant dû à la taille finie des éléments du couvert. Cette dépendance se traduit par l'effet Hot-Spot du couvert.

Pour évaluer de façon analytique la réflectance du couvert due à la diffusion au premier ordre, on suppose que la densité de surface de feuille, les propriétés optiques et l'orientation des feuilles, et le motif des feuilles sont indépendants de la profondeur.

La fonction de phase est déterminée par la distribution d'inclinaison de feuille et les propriétés optiques des phytoéléments. On considère séparément la réflexion diffuse et la transmission des feuilles, et la réflexion spéculaire à l'interface air-cire de la feuille. La fonction de phase de la part diffuse et la fonction d'orientation de surface foliaire sont données par Ross (1981). Pour la fonction de phase de la réflectance spéculaire (formule de Fresnel), on fait intervenir un facteur (Vanderbilt et Grant, 1985) de modification pour tenir compte de la réduction de la réflexion spéculaire par les structures aciculaire de la feuille. Ce facteur est fonction d'un paramètre qui est déterminé par les propriétés de la surface de la cire du cuticule de la feuille (les dimensions de l'enveloppe).

Pour extraire la fonction de phase et la fonction d'orientation de surface foliaire, l'orientation des feuilles est décrite par une distribution elliptique. L'excentricité (ϵ) et l'inclinaison (J_m) détermine la nature de la distribution. La distribution elliptique est une généralisation de la distribution ellipsoïde (Campbell, 1986) et elle permet de décrire les orientations théoriques connues des feuilles (de Wit, 1965). La variation de ϵ de 0 à 1 exprime des orientations allant de la sphérique (0) à l'angle d'inclinaison fixé (1); l'angle modal d'inclinaison J_m est 0° pour une orientation érectophile et 90° pour une orientation planophile.

Remarque : la distribution elliptique ne peut pas décrire l'orientation extremophile.

orientation	excentricité	inclinaison
sphérique	0	/
feuilles horizontales	1	90°
feuilles verticales	1	0°
planophile	0.98	0°

erectophile	0.98	90°
-------------	------	-----

Réflectance simple du sol

La composante de diffusion simple provenant du sol ρ_s^1 est calculée de façon similaire à ρ_c^1 . Interviennent la réflectance bidirectionnelle du sol et la probabilité de voir du sol ensoleillé. La réflectance bidirectionnelle du sol est issue de la réflectance nadir du sol $\rho_{\text{soil}}(J^*,0)$ si l'angle solaire est J^* . Il reste le seul paramètre d'entrée du sol pour ce modèle de réflectance.

Composante de la diffusion multiple

Le champ radiatif de diffusion multiple peut être obtenu en résolvant l'équation du transfert radiatif, mais résoudre cette équation intégral-différentielle est un problème mathématique sérieux. Une solution approximative grossière du problème de la diffusion multiple est utilisée sous la forme d'une formule analytique.

Réflectance bidirectionnelle

En combinant les 3 composantes, on obtient une expression analytique pour la réflectance bidirectionnelle du couvert.

Les paramètres d'entrée sont :

1) 5 paramètres optiques :

R_D : un coefficient de réflexion diffuse pour les phytoéléments,

T : un coefficient de transmission pour les phytoéléments,

n : un index de réfraction de la cire du cuticule de la feuille,

k : un paramètre qui prend en compte la réduction de la réflexion spéculaire par les structures aciculaires de la feuille,

$\rho_{\text{soil}}(J^*,0)$: la réflectance au nadir du sol, l'angle zénithal solaire étant J^* .

2) 4 paramètres de structure :

L_o : l'indice foliaire,

I_L : la taille linéaire adimensionnelle des phytoéléments,

ε : l'excentricité de la distribution elliptique des normales aux feuilles,

J_m : l'inclinaison modale de la feuille,

et les angles solaires et de visée J', J, j .

Les 3 composantes permettent donc d'obtenir la réflectance bidirectionnelle du couvert végétal ρ_1 .

Irradiance totale

Pour des conditions d'irradiance diffuse, la réflectance hémisphérique-directionnelle $\rho_D(J)$ peut être calculée comme la moyenne du poids (sur 2π) de la réflectance bidirectionnelle ρ_1 . Cette intégrale est résolue numériquement, en considérant la distribution de l'intensité lumineuse du ciel uniforme. L'irradiance totale peut être calculée comme la somme pondérée des réflectances ρ_1 et ρ_D .

$$\rho_Q(J', J, j) = I_1'/Q_1 \rho_1(J', J, j) + (1 - I_1'/Q_1)\rho_D(J)$$

I_1' , D_1 et Q_1 sont les irradiances spectrales directe, diffuse et totale sur le plan horizontal au dessus du couvert. Pour l'irradiance totale, un paramètre d'entrée supplémentaire, le rapport des flux direct et diffus, doit être donné.

c. Conclusion

Le modèle de réflectance permet d'étudier la dépendance de l'intensité lumineuse réfléchie par un couvert végétal homogène, avec le LAI, avec les conditions d'illumination, avec les propriétés optiques des feuilles et du sol, et avec la structure de la plante.

Des tests ont montré que ce modèle permet de reproduire raisonnablement bien diverses dépendances de la réflectance de couvert avec les paramètres de structure et la géométrie de visée si le couvert est homogène.

