N° d'ordre : 3053

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE

Spécialité : Télédétection Spatiale de la Biosphère Continentale

Par

Patrick Estève

INVERSION DU MODELE DE TRANSFERT RADIATIF DART

soutenue le 6 Juillet 1998 devant la commission d'examen composée de :

M. Bruno Andrieu	Chargé de recherche INRA, Grignon	Examinateur
M. François-Marie Bréon	Ingénieur CEA, LMCE, Saclay	Rapporteur
M. Jacques Fontès	Ingénieur de recherche CNRS, LET, Toulouse	Examinateur
M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry	Professeur UPS, CESBIO, Toulouse	Directeur de thèse
M. Patrick Mascart	Physicien OMP, LA, Toulouse	Président du jury
M. Bernard Saugier	Professeur Paris XI, LEV, Orsay	Rapporteur

---

Centre d'Études Spatiales de la BIOsphère
18, avenue Édouard Belin
31401 Toulouse Cedex 4

Résumé : La télédétection spatiale peut permettre la surveillance des écosystèmes à condition de relier l'information radiométrique qu'elle fournit aux paramètres biophysiques. L'approche classique consiste à établir des relations empiriques entre le signal radiométrique et le paramètre recherché. Une méthode alternative est apparue avec le développement des modèles de transfert radiatif simulant la réflectance d'un milieu à partir de ses caractéristiques. L'inversion consiste alors à retrouver ces caractéristiques à partir de l'information radiométrique. Cette thèse présente l'inversion du modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer). Celui-ci permet une représentation fine du paysage et une simulation précise des principaux mécanismes d'interaction. Cependant, il est caractérisé par des temps de calcul relativement longs. Cette contrainte a imposé le développement de méthodes particulières pour l'inversion. L'approche repose sur l'utilisation de tables précalculées : des simulations sont effectuées pour un nombre important de jeux de paramètres d'entrée. Une procédure d'interpolation, associée à un modèle analytique, permettent de recréer une simulation pour des valeurs quelconques de paramètres d'entrée. L'inversion est alors réalisée par la méthode du simplexe. Un programme informatique a permis de rendre le processus d'inversion le plus opérationnel possible. Des exemples d'application sont présentés. Il s'agit à chaque fois de collaborations entre écologistes et physiciens permettant de répondre à des préoccupations concrètes telles que la surveillance de la mortalité ligneuse au Burkina Faso, à partir d'images Landsat MSS, ou bien la création de cartes de LAI sur la forêt de Fontainebleau, à partir d'images SPOT. L'inversion, comparée aux méthodes plus classiques, permet une meilleure utilisation des données disponibles et nécessite moins de mesures in situ. Sa capacité d'évolution est de plus très importante.

Abstract : Remote sensing can become an interesting tool for ecosystems monitoring, provided we can relate radiometric information to biophysical characteristics. Classical methods use empirical relations between the radiometric signal and the desired parameter. Another method appeared with the development of radiative transfer models, which simulate landscape reflectance with respect to its characteristics. Inversion consists then in extracting some input parameters of these models from the radiometric information. This document describes the inversion of the DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) model. The latter accounts for landscape structures, and simulates radiative transfer with a good accuracy. However, it is characterised by a long calculation time. This led us to develop special methods for inversion. The general approach is based on the use of a look up table : simulations are made for many sets of parameters. An interpolation procedure and a special analytical function are used in order to recreate simulations for any set of parameters. Then, inversion is conducted with the simplex method. A software was developed in order to make the use of this inversion procedure as easy as possible. Case studies are shown. They rely on collaborations between ecologists and physicists in order to study concrete ecological problems as tree death in Burkina Faso. This was assessed with Landsat MSS images. The inversion approach was also used to map LAI of Fontainebleau forest (France), with SPOT images. Compared to more classical methods, such as empirical relationships, inversion allows a better use of the data, requires less in-situ measurements and is prone to important evolution.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....1

Chapitre I : APERÇU SUR LA MODÉLISATION ET L'INVERSION.....5

I.1 Modélisation du transfert radiatif dans la végétation.....5
I.1.1 Les modèles turbides. 5
I.1.2 Les modèles géométriques.....6
I.1.3 Les modèles discrets. 6
I.2 Le modèle DART.....7
I.3 Inversion des modèles de transfert radiatif dans la végétation. 7
I.3.1 Inversion des modèles turbides.....8
I.3.2 Inversion des modèles complexes.....10

Chapitre II : UNE MÉTHODE D'INVERSION DU MODÈLE DART.....15

II.1 Généralités sur l'inversion et les différentes méthodes. 17
II.2 Inversion d'un modèle de transfert radiatif. 17
II.3 Inversion du modèle DART. 18
II.4 Mise au point d'une méthode d'inversion. 20
II.4.1 Les paramètres d'entrée du programme. 21
II.4.2 Mise en place des différentes simulations. 32
II.4.3 Traitement des simulations. 35
II.4.4 Procédure d'inversion. 49

Chapitre III : EVALUATION DE LA MORTALITÉ LIGNEUSE AU BURKINA FASO À PARTIR D'IMAGES LANDSAT MSS 59

III.1 Introduction. 59
III.1.1 Les milieux tropicaux secs et leur surveillance par télédétection. 59
III.1.2 Le site d'étude. 60
III.1.3 Les deux objectifs de l'étude. 62
III.2 Un modèle simplifié de la réflectance du paysage et son inversion. 62
III.2.1 Configurations de visée. 64
III.2.2 La réflectance des différents éléments du paysage. 64
III.2.3 Mise en place du modèle de réflectance du paysage. 70

III.2.4 Inversion du modèle de réflectance. 72
III.2.5 Test de robustesse de l'inversion. 72
III.3 Résultats de l'inversion et validation. 73
III.3.1 Validation des résultats à partir de photographies aériennes noir et blanc 74
III.3.2 Mise au point d'un protocole de validation systématique. 77
III.4 Analyse écologique des résultats. 86
III.4.1 Dégradation de la couverture ligneuse. 86
III.4.2 Comparaison entre le taux de recouvrement et le NDVI. 87
III.4.3 Calcul de la mortalité ligneuse. 89
III.4.4 Le point de vue de l'écologiste 91
III.5 Conclusion 92

Chapitre IV : INVERSION D'IMAGES SPOT SUR LA FORÊT DE FONTAINEBLEAU ... 95

IV.1 Introduction. 95
IV.1.1 Le site d'étude. 96
IV.1.2 Les données disponibles. 97
IV.1.3 Définition, mesure et utilisation du LAI. 97
IV.1.4 Les objectifs de l'étude. 98
IV.2 Traitement et inversion des images SPOT. 99
IV.2.1 Extraction des sous-images et géoréférencement. 99
IV.2.2 Qualité radiométriques des images SPOT. 99
IV.2.3 Normalisation des réflectances SPOT. 101
IV.2.4 Distinction entre les différentes espèces. 106
IV.2.5 Choix des paramètres libres et fixes de l'inversion. 107
IV.2.6 Calcul de la table de simulations. 108
IV.2.7 Inversion des images SPOT. 108
IV.3 Résultats. 109
IV.3.1 Résultats d'inversion 109
IV.3.2 Calcul du LAI à l'aide de relations empiriques. 110
IV.3.3 Validation des procédures de calcul du LAI à partir des mesures terrains. 114
IV.3.4 Comparaison de l'inversion des modèles SAIL et DART. 117
IV.3.5 Analyse de la série d'images de LAI. 117
IV.3.6 Comparaison des deux images de 1996. 120
IV.3.7 Calcul du NDVI à partir du canal vert. 121
IV.4 Conclusion 123

Chapitre V : INVERSION DE DONNÉES MULTISPECTALES ET MULTIDIRECTIONNELLES POLDER 127

V.1 Introduction. 127
V.1.1 Le site d'étude. 127
V.1.2 Les données disponibles. 128
V.1.3 Objectif de l'étude. 128
V.2 Inversion des données POLDER aéroporté. 129
V.2.1 Choix des paramètres libres. 129
V.2.2 Calcul de la table de simulations. 129
V.3 Inversion et résultats. 130
V.3.1 Inversion de FDRB POLDER mesurées sur différents sites. 130
V.3.2 Inversion d'images multispectrales et multidirectionnelles. 131
V.3.3 Amélioration de l'utilisation des données multidirectionnelles. 133
V.4 Conclusion. 133

CONCLUSION 137

BIBLIOGRAPHIE 143

INTRODUCTION

Depuis le début des années soixante-dix, la terre est observée de manière continue par l'intermédiaire de nombreux satellites. Une question importante est de savoir à quoi servent effectivement ces observations. Parmi les domaines reconnus, où les capteurs spatiaux apportent des informations utiles voire indispensables, on peut citer, la cartographie, la météorologie et l'espionnage militaire. Cependant, une autre application escomptée de la télédétection spatiale est la surveillance des écosystèmes. Dans ce but, un grand nombre de chercheurs se consacrent au développement de méthodes d'extraction de paramètres biophysiques à partir des données de télédétection. Dans les domaines du visible et du proche infrarouge, les paramètres recherchés sont par exemple le taux de recouvrement, permettant le suivi des cultures et des forêts et donc la gestion des ressources naturelles, ou encore la surface foliaire, intervenant de manière importante dans le processus de photosynthèse et donc dans les flux de CO_2 à l'interface biosphère atmosphère. La surveillance de ces paramètres à partir de mesures sur le terrain, est impensable à grande échelle, compte tenu du travail que cela représente. La télédétection spatiale, de par sa capacité à surveiller l'ensemble du globe terrestre à des fréquences allant de quelques heures à plusieurs dizaines de jours, peut apporter une solution, à condition que l'on puisse relier de manière fiable les quantités biophysiques aux données radiométriques acquises par les satellites. Cette préoccupation est à l'origine d'un axe important de recherche : la modélisation de la mesure satellitale et l'inversion de ces modèles. La modélisation permet de relier, par l'intermédiaire d'équations mathématiques, les caractéristiques de la végétation aux mesures satellitales. Ces équations peuvent décrire le phénomène physique réel. Elles simulent alors le cheminement de l'onde électromagnétique (la lumière dans le cas d'observation dans le visible) de la source jusqu'au capteur ; ce processus est appelé transfert radiatif. Elles peuvent également dériver de mesures expérimentales, dans ce cas on dit qu'elles sont empiriques. Les modèles de transfert radiatif développés depuis plusieurs dizaines d'années représentent de manière plus ou moins précise, d'une part les différents milieux intervenant (végétation, sol, atmosphère) et d'autre part les phénomènes physiques entrant en jeu. Dans le cadre de la recherche de paramètres biophysiques, ils présentent tous un inconvénient majeur. En effet, les caractéristiques du milieu ne sont pas des paramètres de sortie des modèles mais plutôt des paramètres d'entrée, du moins pour les modèles qui simulent effectivement le transfert radiatif. Le but de

l'inversion est de permettre d'obtenir en sortie les paramètres biophysiques en utilisant les mesures satellitales comme entrée. L'équipe de Goel (1989) a ouvert la voie dès 1983. De nombreuses études ont suivi depuis. Elles ont mis en évidence la grande difficulté des problèmes d'inversion et la nécessité d'utiliser des méthodes à la pointe des techniques informatiques et mathématiques, comme les réseaux de neurones (Kimes et Nelson, 1998). Un aperçu des différents travaux de recherche sur les modèles de transfert radiatif dans la végétation et leur inversion est présenté dans le chapitre I.

C'est dans ce contexte que se situe le sujet de cette thèse : l'inversion du modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer). Ce modèle a été développé au sein du CESBIO par Gastellu-Etchegorry *et al.* (1996). Il simule de manière précise la réflectance visible et proche infrarouge de couverts tels que les forêts ou les savanes. Son atout essentiel, par rapport à d'autres modèles, réside dans sa grande précision de représentation du paysage. Accueilli de manière favorable par la communauté des modélisateurs, il restait à démontrer, pour accroître son intérêt, qu'il était inversible.

L'objectif de cette thèse était de répondre à deux questions : comment et pourquoi inverser le modèle DART ? Les réponses à ces deux questions sont fortement dépendantes, car la méthode d'inversion va dépendre de l'utilisation pour laquelle elle a été prévue. Ceci est illustré par le chapitre III de cette thèse, où une méthode spécifique d'inversion a été développée pour un problème concret : le calcul du taux de recouvrement ligneux au Sahel, à partir d'images Landsat MSS.

Il était cependant nécessaire de développer une méthode opérationnelle applicable à un grand nombre de cas d'étude et de types de données. Pour cela un programme d'inversion, présenté dans le chapitre II, a été développé. Il permet de retrouver des paramètres tels que la réflectance du sol, la surface foliaire du sous-bois et des arbres ainsi que le taux de recouvrement arboré. Il peut être utilisé avec des données multispectrales de type SPOT, (*cf.* chapitre IV, avec l'étude de la dynamique du LAI sur le forêt de Fontainebleau), ou bien avec des mesures multidirectionnelles et multispectrales (*cf.* chapitre V, avec l'inversion de données POLDER aéroporté sur la forêt boréale).

Toute thèse a pour objectif de contribuer à l'amélioration de notre connaissance. De même que les aspects « innovation » et « développement », l'aspect « transmission » est donc fondamental. Ceci explique les nombreux détails techniques mentionnés dans le texte, à priori inutiles pour la compréhension de l'approche théorique. Ils ont pour but de faciliter la poursuite du travail déjà engagé.

APERÇU SUR LA MODELISATION ET L'INVERSION

L'objectif de ce chapitre est de présenter brièvement les différents types de modèles de transfert radiatif dans la végétation, leurs caractéristiques principales et les conséquences pour l'inversion. Des revues plus complètes sur ce domaine existent (Demarez, 1997 ; Pinel, 1997), ainsi qu'un nombre important d'articles décrivant un modèle particulier. Il conviendra donc de s'y rapporter pour obtenir des informations plus précises. Ce chapitre résume également différentes études d'inversion de modèles de transfert radiatif réalisées à ce jour.

Modélisation du transfert radiatif dans la végétation.

La réflectance d'un milieu peut être simulée, en fonction des conditions d'éclairement et des paramètres de ce milieu, avec de simples fonctions mathématiques obtenues de manière empirique, ou encore avec des modèles de transfert radiatif. Dans ce chapitre, seuls les modèles basés sur les phénomènes physiques régissant la propagation du rayonnement à l'intérieur du couvert, seront présentés. On peut les classer à partir de leur mode de représentation du milieu.

Les modèles turbides.

Ces modèles considèrent le milieu comme un empilement de couches horizontales infinies. Les éléments foliaires sont distribués de manière homogène à l'intérieur de ces couches. Ils sont caractérisés par leur réflectance, leur transmittance, leur distribution angulaire (LAD) et leur surface (LAI m^2/m^2). Différentes méthodes de résolution des équations du transfert radiatif peuvent alors être utilisées : méthode intégrale itérative (Myneni *et al.*, 1991), modèles à 3 flux (Kubelka et Munk, 1931 ; Suits, 1972), méthode des ordonnées discrètes (Goudrian, 1977), ... etc.

Ces modèles sont bien adaptés aux milieux homogènes tels que les cultures par exemple. Le plus connu est le modèle SAIL (Verhoef, 1981). L'avantage de ces modèles est la rapidité des

simulations, ce qui permet une inversion directe avec les méthodes classiques telles que celle du simplexe.

Les modèles géométriques.

Ils représentent la végétation par des éléments géométriques (cylindres, sphères, ellipsoïdes, cônes) répartis à l'intérieur du paysage. Ces éléments sont caractérisés par leur transmittance et leur réflectance. La réflectance du paysage est une combinaison linéaire des réflectances apparentes de tous les éléments présents, pondérées par leur section efficace. Elle peut donc être obtenue par un calcul géométrique. Certains modèles font intervenir les diffusions multiples (Li *et al.*, 1995). Ces modèles sont bien adaptés à la représentation de milieux forestiers peu denses. Leur temps de calcul peut être contraignant pour l'utilisation en mode inverse, qui peut nécessiter l'utilisation de méthodes spécifiques telles que les réseaux de neurones.

Cependant, certains modèles de ce type ont été développés spécialement en vue de leur inversion. Ainsi, le modèle FLIM (forest-light interaction model) (Rosema *et al.*, 1992) permet d'exprimer la réflectance des forêts de conifères, à partir de fonctions analytiques faisant intervenir le taux de recouvrement et le LAI. La forêt est considérée comme une couche horizontale hétérogène, formée de couronnes d'arbres et de trous. Les diffusions multiples sont négligées.

Les modèles discrets.

La végétation est discrétisée soit directement à l'aide d'éléments surfaciques (Govaerts, 1995), représentant les feuilles, soit à l'aide d'éléments volumiques (Kimes et Kirchner, 1982 ; Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996), représentant par exemple un ensemble de feuilles. Les éléments sont caractérisés par leur fonction de phase, c'est-à-dire la probabilité qu'un rayonnement issu d'une certaine direction soit diffusé vers une autre direction. La simulation du transfert radiatif peut s'effectuer en combinant le lancer de rayons avec la méthode de Monte Carlo (Govaerts, 1995). Un nombre important de rayons, assimilés à des photons, doit alors être lancé. A chaque rencontre d'un élément, les probabilités d'interception (absorption et diffusion) et, s'il y a lieu, la direction de diffusion sont tirées de manière statistique, en accord avec la fonction de phase. Une autre possibilité consiste à lancer un nombre limité de rayons, assimilés alors à des flux énergétiques, et à suivre leur propagation suivant N directions discrètes (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996). Ces modèles sont caractérisés par une

très bonne représentation du milieu et des phénomènes physiques, et donc par la fiabilité des simulations. Le temps de calcul est cependant très important. L'inversion devra donc faire appel à des méthodes spécifiques.

Le modèle DART.

Le modèle DART (Gastellu-Etchegorry *et al*., 1996) fait partie de la catégorie des modèles discrets. Il simule le transfert radiatif à l'intérieur d'un paysage hétérogène en prenant en compte son architecture 3-D. Le paysage peut comporter des arbres, des arbustes, de l'herbe, du sol, de l'eau, ... La scène est divisée en cellules rectangulaires dont la dimension est choisie par l'opérateur. Les diffusions et la propagation énergétique sont simulées par la méthode des ordonnées discrètes : un nombre limité de rayons est lancé dans la maquette. Le programme suit la diffusion de l'énergie suivant les N directions discrètes. La topographie, le hot-spot, la réflexion spéculaire et la polarisation sont aussi modélisés. La liste des paramètres d'entrée est donnée dans le chapitre II. Le modèle fournit des images de réflectance associées à différents angles de visée, ainsi que la distribution 3-D de l'énergie interceptée et absorbée, ce qui permet l'étude de la photosynthèse et de la production primaire. De par ses caractéristiques, ce modèle est bien adapté aux milieux hétérogènes, tels que les forêts, les savanes, ...

Son défaut essentiel, dans le cadre de l'inversion, est son temps de calcul relativement long : de quelques minutes pour une scène simple (une dizaine d'arbres) à plusieurs heures pour une scène plus importante et ceci pour une seule configuration d'éclairement et une seule longueur d'onde.

Inversion des modèles de transfert radiatif dans la végétation.

Cette voie de recherche a été ouverte par Goel *et al.* (1983, 84 et 89) dès 1983. L'objectif est d'obtenir des paramètres biophysiques à partir de données satellitales. Les premières inversions ont été réalisées sur des modèles turbides. Ces méthodes se sont développées jusqu'à leur utilisation opérationnelle dans les chaînes de traitement des données spatiales comme celle des images POLDER (Bicheron *et al.*, 1998). L'avantage des méthodes d'inversion par rapport aux méthodes empiriques est la possibilité d'intégrer de manière simple dans le calcul, la totalité des mesures disponibles, contrairement aux approches empiriques qui se limitent la plupart du temps à un rapport de deux mesures tel que l'indice de végétation normalisé (NDVI). Plus récemment, l'inversion des modèles plus complexes s'est

développée avec l'utilisation de méthodes telles que les réseaux de neurones. Les paragraphes suivants présentent de manière très résumée quelques cas d'étude.

Inversion des modèles turbides.

Goel et Thompson (1984) ont réalisé l'inversion du modèle SAIL à partir de mesures in situ de réflectances multidirectionnelles dans le proche infrarouge (PIR), sur une culture de soja. Les paramètres libres étaient la surface foliaire (LAI) et deux paramètres (μ et ν) décrivant la distribution angulaire foliaire (LAD). Les valeurs de LAI obtenues par inversion concordaient assez bien avec les mesures, ce qui a démontré l'intérêt de la méthode. Le couplage du modèle SAIL avec le modèle PROSPECT (Jacquemoud *et al.*, 1990), simulant les propriétés optiques foliaires, en fonction de paramètres tels que la teneur en chlorophylle (C_{ab}), le contenu en cellulose (C_c) ou le nombre de couches des feuilles (N), a permis d'étendre le champ d'utilisation de l'inversion à la recherche des caractéristiques biochimiques des feuilles. Cependant l'application de ces méthodes d'inversions aux données spatiales n'est pas toujours vue avec optimisme, en particulier du fait des différentes perturbations atmosphériques (Jacquemoud, 1993). D'autres études ont montré l'intérêt de l'inversion de modèle appliquée à des mesures in situ de reflectances multidirectionnelles. Ainsi l'inversion du modèle de Nilson et Kuusk (1989), a permis de retrouver des paramètres tels que le LAI, la dimension et l'orientation des feuilles sur des cultures (Kuusk, 1991). Les travaux de Gao et Lesht (1997) et Privette *et al.* (1996) lors de la campagne FIFE(1) ont abordé l'optimisation de l'inversion à partir de données multidirectionnelles et son application aux données NOAA AVHRR pour le calcul du LAI sur les prairies. Enfin, il faut citer un programme ambitieux concernant l'inversion du modèle de Kuusk (1994) testée à la fois sur les données POLDER(2) aéroporté et spatial en vue d'une intégration de la procédure dans les chaînes de traitement des données spatiales (Bicheron et Leroy, 1998). Les principales caractéristiques de ces différentes études sont résumées dans le Tableau 0.1.

(1) FIFE : First ISLSCP Field Experiment. Étude des écosystèmes de prairies aux États Unis.
(2) POLDER aéroporté (Deschamps *et al.*, 1994) : instrument composé d'une matrice CCD (288×384 pixels), d'une optique à large champ (+/- 57° suivant la diagonale) et d'une roue porte filtres permettant des acquisitions dans 5 canaux spectraux à bande étroite (20 nm maximum) centrés sur 443, 550, 670, 864 et 910 nm. Le traitement des images acquises sur plusieurs axes de vols permet d'obtenir des images multispectrales et multidirectionnelles. L'instrument spatial, embarqué sur le satellite ADEOS, a des caractéristiques identiques excepté pour les bandes spectrales qui sont centrées sur les longueurs d'onde suivantes : 443, 490, 565, 670, 763, 765, 865 et 910 nm. L'instrument permet également une mesure de la polarisation pour certaines bandes spectrales : celles centrées sur 443, 670 et 865 nm dans le cas de la version spatiale.

	Goel 1984	Kuusk 1991	Privette 1996	Gao 1997	Bicheron (1998)
Modèle inversé	SAIL	Nilson-Kuusk	DISORD (Myneni1992)	Gao (1993)	Kuusk (1995)
Milieu étudié	Culture (soja)	Culture (orge trèfle)	Prairies (FIFE)	Prairies (FIFE)	Forêts, savanes cultures.
Mesures de réflectances	In situ PIR 50 directions	In situ PIR, rouge ~13 directions.	NOAA AVHRR PIR ≠ directions	Parabola NOAA AVHRR	POLDER aéroporté
Paramètres libres	2 : LAI et LAD (μ,ν)	11 (ou 9 pour l'inversion sur un seul canal)	LAI (1) (LAI, ω_f) (2)	4 : LAI, ω_f, ρ_{sol} n (LAD)	8 : LAI, l*, a_1, w_a, w_b, C_{ab}, C_c, N
Données de validation	1 date LAI=2,87 ALA=1,9	20 dates 0,4<LAI<5,7	20 dates 1,7<LAI<2,8		38 mesures LAI, *f*APAR 0,2<LAI<5,1
Résultat d'inversion	LAI=3,09 ALA=55,1	erreur moyenne sur le LAI orge : 2,38 trèfle : 1,25	RMSE LAI : 0,22 (1) LAI : 1,06 (2) ω_f : 0,051 (2)		RMSE LAI : 0,7 *f*APAR :0,097

Tableau 0.1 : Exemples d'études d'inversion. (Goel *et al.,* 1984 ; Kuusk, 1991 ; Privette *et al.,* 1996 ; Gao *et al.,* 1997 ; Bicheron *et al.,* 1998). La colonne de gauche indique le modèle inversé, le type de milieu sur lequel l'inversion est appliquée, les mesures de réflectances utilisées en entrée de l'inversion, les paramètres laissés libres dans l'inversion, les données terrain utilisées pour la validation et les résultats de la validation. Les indices (1) et (2) relatifs à l'étude menée par Privette *et al.,* 1996, correspondent à deux cas d'inversion réalisée avec 1 ou 2 paramètres libres. Les termes et quantités introduits dans ce tableau sont brièvement décrits ci-dessous.

PARABOLA (Deering *et al.,* 1990) : instrument mesurant la FDRB (Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle) de tout type de milieu (forêts, cultures, ...). Il peut effectuer une mesure intégrale de l'espace des directions (4π) avec un angle de vue instantané de 15°, dans 3 bandes spectrales (650-670 nm 810-840 nm et 1620-1690 nm), en 11 secondes.

LAD : Leaf Angular Distribution. Distribution des directions normales foliaires. Elle peut être définie par un paramètre n (Gao *et al.,* 1997) ou deux paramètres μ et ν (Goel *et al.,* 1984).

ALA : Average Leaf Angle. Direction moyenne de la normale foliaire.

ω_f : albédo foliaire, égal à la somme de la réflectance et de la transmittance.

ρ_{sol} : réflectance du sol.

l* : rapport de la taille de la feuille sur la taille du couvert.

a_1 : paramètre de variation spectrale de la réflectance du sol.

w_a, w_b : paramètres de variation directionnelle de la réflectance du sol.

*f*APAR : fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif.

Le principe d'inversion (*cf.* chapitre II) utilisé est en général basé sur la minimisation d'une fonction coût $F(X)=\sum_{j=1}^{m} W_j\left(\rho_j^* - \rho_j\right)^2 + \sum_{i=1}^{p}\left[(x_i - x_{i,b})^2 \omega_i\right]^2$ (Goel *et al.* 1983, Nilson *et al.* 1989). Avec m le nombre de mesures, ρ_j^* la $j^{ème}$ mesure de réflectance, ρ_j la valeur simulée correspondante. W_j est le poids affecté à la $j^{ème}$ mesure. Le deuxième terme de la fonction coût représente la pénalité associée au fait que les paramètres libres x_i restent ou non à l'intérieur d'un domaine $x_{i,b}$ fixé par l'utilisateur. Par exemple, si $x_i<x_{i,b}$ $\omega_i=0$ sinon ω_i prend une valeur très grande. Concernant le poids W_j affecté à chaque mesure Kuusk *et al.* (1989) utilisent $W_j = \frac{1}{\rho_j^*}$. Privette *et al.* (1996) ont mené une réflexion intéressante sur le choix des directions de visée lors de l'utilisation de réflectances bidirectionnelles et sur le poids affecté à ces directions. Ils suggèrent l'utilisation de $W_j = W_{i,j}^{'} = \left|\frac{\partial \rho_j}{\partial p_i}\right| \cong \left|\frac{\Delta \rho_j}{\Delta p_i}\right|$ représentant la dérivée partielle en j du modèle de réflectance par rapport au paramètre p_i pour lequel on recherche la meilleure précision. Cette méthode permet d'obtenir une inversion plus rapide et plus précise. Elle permet, en plus, de sélectionner les directions fournissant le maximum d'information, grâce à la valeur de W_j, et d'en limiter ainsi le nombre.

La procédure de minimisation utilisée est en général celle du simplexe (Nelder *et al.*, 1965). Son fonctionnement est expliqué dans le chapitre II. Deux autres procédures ont été testées par Privette *et al.* (1994) : l'algorithme de Powell (1964) et la méthode de quasi-Newton. Les résultats obtenus ont confirmé la supériorité de la procédure du simplexe pour résoudre ce type de problème.

Plus récemment, des études sur l'inversion de modèles turbides à l'aide des réseaux de neurones ont été réalisées avec succès (Baret *et al.*, 1995). Cette méthode est présentée brièvement dans le paragraphe suivant.

Inversion des modèles complexes.

Une des principales contraintes des modèles complexes est leur temps de calcul relativement long. Leur inversion par les méthodes classiques, telles que le simplexe, va alors prendre un temps trop important pour permettre l'inversion à partir d'images. Différentes solutions à ce problème ont été envisagées telles que l'utilisation de réseaux de neurones.

L'utilisation des réseaux de neurones pour l'inversion des modèles de transfert radiatif a été résumée récemment par Kimes *et al.* (1998). Un réseau de neurones est constitué de nœuds

pouvant être répartis en couches. La première couche représente les entrées (mesures de réflectance par exemple), la dernière les sorties (paramètres biophysiques par exemple). Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées. Les noeuds sont interconnectés de manière plus ou moins complexe. Les noeuds sont en réalité de simples fonctions mathématiques paramétrées, calculant la valeur de sortie en fonction des valeurs d'entrée. Les paramètres de ces fonctions sont déterminés lors d'une phase dite d'apprentissage, basée sur l'utilisation d'un jeu d'entrées/sorties. Dans le cas de l'inversion d'un modèle de transfert radiatif, ce jeu est obtenu par simulation directe des réflectances à l'aide du modèle. Une fois la phase d'apprentissage terminée, le réseau de neurones ainsi constitué peut déterminer de manière extrêmement rapide les paramètres biophysiques recherchés à partir de mesures de réflectance.

Abuelgasim *et al.* (1998) ont testé l'utilisation d'un réseau de neurones pour inverser le modèle de Li et Strahler (1985). Les paramètres libres sont la densité d'arbres, la forme du houppier et la hauteur de la canopée. Le réseau comporte donc 3 sorties et 22 entrées dont 18 valeurs de réflectance bidirectionnelles (pour des directions fixes), l'angle solaire et 3 signatures spectrales (paramètres d'entrée du modèle). L'étude est essentiellement théorique, 2000 simulations ont été utilisées pour la phase d'apprentissage du réseau, et 200 pour la phase de test. Les résultats montrent la possibilité de retrouver par inversion la densité, la forme et la hauteur avec un coefficient de corrélation r^2 égal respectivement à 0,86 , 0,76 et 0,76. Cependant l'inversion n'a été réalisée qu'avec des données théoriques. Qu'en est il de l'application à des données réelles ? Les directions d'acquisition de données multidirectionnelles sont rarement fixes. Comment alors adapter la méthode ?

Une alternative à l'utilisation des réseaux de neurones consiste à simplifier au maximum les modèles complexes en utilisant en particulier des tables précalculées. Cette méthode permet de limiter le nombre de calculs effectués à chaque simulation. L'algorithme recherche dans la table les paramètres nécessaires au calcul de la réflectance en fonction des paramètres d'entrée. L'espace des paramètres étant décrit de manière discrète dans la table, une procédure d'interpolation peut éventuellement être utilisée pour décrire cet espace de manière continue. Cette approche a été utilisée dans l'algorithme d'inversion du modèle DART qui est présenté en détail dans le chapitre II. On peut citer d'autres exemples d'utilisation d'approches tabulées. Knyazikhin *et al.* (1998) ont, en particulier, développé un algorithme de traitement des données MODIS et MISR permettant l'extraction du LAI et du FAPAR. Ces instruments seront lancés au cours de l'année 1998 sur la plate-forme EOS-AM1. Ils permettront

d’acquérir à la fois des données multiangulaires et multispectrales. La méthode distingue 6 biomes différents avec une modélisation adaptée à chacun. L’algorithme permet de retrouver la valeur de LAI optimale à l’intérieur d’une table précalculée.

I APERÇU SUR LA MODÉLISATION ET L'INVERSION.....5
I.1 Modélisation du transfert radiatif dans la végétation.....5
I.1.1 Les modèles turbides. 5
I.1.2 Les modèles géométriques.....6
I.1.3 Les modèles discrets. 6
I.2 Le modèle DART.....7
I.3 Inversion des modèles de transfert radiatif dans la végétation. 7
I.3.1 Inversion des modèles turbides.....8
I.3.2 Inversion des modèles complexes.....10

Tableau I.1 : Exemples d'études d'inversion. (Goel et al., 1984 ; Kuusk, 1991 ; Privette et al., 1996 ; Gao et al., 1997 ; Bicheron et al., 1998). 9

UNE METHODE D'INVERSION DU MODELE DART

Ce chapitre décrit à la fois la méthode et le programme utilisés pour inverser le modèle DART. Les différentes étapes sont décrites dans le détail afin de guider les utilisateurs potentiels de ce programme. Cependant, avant de vouloir inverser le modèle DART, il est nécessaire de savoir l'utiliser de manière correcte en mode direct et en particulier d'avoir à l'esprit toutes les précautions concernant le choix des paramètres. Pour cela, le lecteur est invité à se référer aux différents travaux antérieurs, thèses ou publications concernant le sujet (Gastellu *et al.* 1996, Gastellu *et al.* 1997, Pinel 1997, Demarez 1997).

Les modèles de transfert radiatif tels que DART sont de simples modèles mathématiques pouvant calculer la réflectance des couverts en fonction de paramètres d'entrée. Leur inversion peut donc se faire à l'aide de méthodes classiques telles que celle du simplexe. Les seules restrictions sont les temps de simulation relativement longs et l'impossibilité d'obtenir les dérivées de manière analytique. En raison de ces difficultés, nous n'avons pas inversé directement le modèle DART. Nous sommes passés par une étape intermédiaire consistant à exprimer la réflectance bidirectionnelle des couverts à l'aide de fonctions mathématiques les plus simples possibles faisant appel à des tables précalculées et à différentes procédures d'interpolation. Ces différents points sont décrits de manière précise dans ce chapitre.

Généralités sur l'inversion et les différentes méthodes.

Soit une fonction $y=f(x)$ à une variable. Inverser f consiste à rechercher la valeur de x correspondant à une valeur y_i de y donnée. Cela revient à résoudre l'équation en x : $y_i=f(x)$. La solution de cette équation dépend évidemment de la fonction f. Elle peut ne pas exister, être unique ou être multiple.

Pour réaliser l'inversion d'une fonction $y=f(\mathbf{x})$ à n variables (avec $\mathbf{x}$ un vecteur de dimension n), on fixe certains paramètres (que l'on appellera paramètres fixes) afin de retrouver les

autres (que l'on appellera paramètres libres). Soit $y=f(\mathbf{u},\mathbf{p})$ la fonction, où **p** est le vecteur de paramètres libres de dimension m et **u** le vecteur de paramètres fixes. La connaissance de k ($k \geq m$) valeurs y_i de y pour différentes valeurs $\mathbf{u}_i$ de **u** permet la recherche du vecteur **p** qui minimise l'erreur : $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(y_i - f\left(\mathbf{u}_i, \mathbf{p}\right)\right)^2$. ε^2 est aussi appelé fonction coût. Il ne s'agit pas d'une inversion au sens strict du terme mais d'une optimisation puisque la valeur finale de la fonction coût peut ne pas être nulle. La solution peut être multiple, mais dans tous les cas elle existe. Cette méthode permet donc de trouver une solution ou un ensemble de solutions approchées du système d'équations $y_i=f(\mathbf{u_i},\mathbf{p})$. Il existe différentes méthodes de minimisation plus ou moins bien adaptées selon les utilisations. Les deux méthodes utilisées dans le programme d'inversion du modèle DART sont résumées ci-dessous :

- ***La méthode des moindres carrés.***

  Elle consiste à résoudre le système de m équations à m inconnues obtenu en posant $\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial p_j} = 0 \ \forall j \in [1, m]$. Elle impose le calcul des dérivées partielles de f par rapport à p_j. En pratique elle est utilisée dans le cas de fonctions simples (polynomiales par exemple).

- ***La méthode du simplexe (Nelder et al., 1965).***

  On construit un élément géométrique de dimension m+1 (le simplexe) en choisissant m+1 points distincts M_i dans un espace de dimension m. La fonction coût est calculée pour ces m+1 points. La procédure fait alors évoluer le point donnant la valeur maximale de la fonction coût. Pour évoluer, ce point peut effectuer trois mouvements élémentaires par rapport au barycentre C des autres points : une homothétie de rapport 2, -1, ou 0,5 (Figure 0.1).

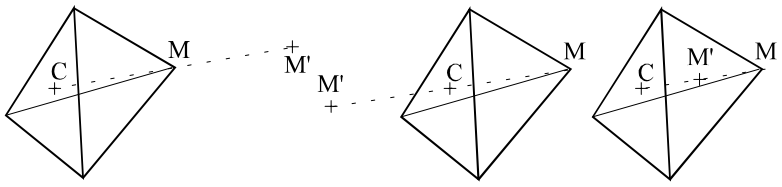


Figure 0.1 : Les trois opérations élémentaires du simplexe qui transforment le point M (donnant la valeur maximale de la fonction coût) en M'. C est le barycentre des autres points.

L'algorithme utilise au besoin les trois déplacements pour diminuer la valeur de la fonction coût au point M. Si la diminution n'est pas suffisante, l'algorithme effectue une contraction de rapport 0,5 autour du point donnant la plus faible valeur de la fonction coût.

L'arrêt de la procédure s'effectue lorsque l'erreur relative entre les valeurs maximale et minimale de la fonction en ces *m+1* points est inférieure à un seuil fixé par l'opérateur. Par cette méthode, l'algorithme peut s'arrêter sur le premier minimum local trouvé. Ceci est un problème majeur qui peut être résolu par :

- un choix judicieux des valeurs de départ, qui va fortement conditionner le résultat final.
- l'utilisation de plusieurs simplexes initiaux différents, le minimum retenu étant alors le plus petit des minima calculés pour chacun de ces simplexes initiaux.

- ***Autres algorithmes de minimisation.***

  D'autres méthodes existent, basées sur l'utilisation de procédures de minimisation à une dimension utilisant ou non le calcul des dérivées premières. On peut citer deux grandes familles de méthodes couramment utilisées : celle du gradient conjugué et celle de quasi-Newton.

Inversion d'un modèle de transfert radiatif.

Les modèles de transfert radiatif fournissent la réflectance d'une scène en fonction d'un nombre plus ou moins important de paramètres (bandes spectrales, angles de visée, angles d'éclairement, structure du couvert, densité foliaire, caractéristiques radiométriques foliaires, ...). Ce sont donc des fonctions à n variables ou n paramètres $y = f(\mathbf{x})$. Leur inversion nécessite d'une part le choix de paramètres libres et fixes, d'autre part la connaissance d'un nombre suffisant de valeurs y_i de *y*. Ces valeurs sont les mesures de réflectance disponibles pour une unité de paysage donnée. Dans la pratique, on peut disposer d'images satellitales ou aéroportées donnant des valeurs de luminances (pouvant être converties en réflectances). Les instruments des satellites tels que SPOT ou Landsat fournissent des valeurs de luminances à un instant donné pour une direction de visée et plusieurs longueurs d'ondes (de 1 à 7). Le nombre de paramètres libres devra donc être inférieur au nombre de canaux utilisés, par exemple trois dans le cas d'une image SPOT. D'autres capteurs comme POLDER permettent d'acquérir des valeurs de luminance, en un point donné, pour différentes conditions de visée, durant un intervalle de temps très court. Ceci permet d'augmenter de manière importante le nombre de données disponibles et donc de paramètres libres.

Concernant le choix des paramètres libres et fixes, Il dépend du type de modèle utilisé. On peut cependant donner quelques indications. Les conditions de mesures ainsi que les caractéristiques propres au capteur, telles que les angles de visée et d'éclairement et les bandes spectrales, sont des paramètres fixes. D'autre part, si la sensibilité du modèle à un paramètre est importante et si celui-ci n'est pas connu avec précision, il sera alors vraisemblablement nécessaire de le placer parmi les paramètres libres afin d'obtenir le meilleur résultat possible. Un autre critère de choix sera l'intérêt thématique du paramètre et sa variabilité. Ainsi, considérons un paramètre tel que le taux de recouvrement arboré des régions sahéliennes. Il peut varier de zéro jusqu'à des valeurs de quarante pour cent, voire plus localement. Son intérêt écologique est très important, puisque le bois constitue une ressource locale essentielle. Pour toutes ces raisons, il a donc été choisi comme paramètre libre lors de l'inversion des images Landsat MSS du Burkina Faso (*cf.* chapitre III).

Inversion du modèle DART.

Deux aspects essentiels pour l'inversion du modèle DART sont présentés ci-dessous. Il s'agit des paramètres d'entrée du modèle et des contraintes liées au temps de calcul.

- ***Les paramètres d'entrée du modèle DART***

  Le fonctionnement du modèle DART nécessite :

  - un fichier décrivant la distribution spatiale des éléments (sol, feuille, ...) présents dans la maquette, cellule par cellule.
  - un fichier décrivant la discrétisation de l'espace angulaire.
  - des fichiers indiquant les propriétés optiques des différents éléments présents.

  Trois programmes sont chargés de créer ces fichiers avant de faire fonctionner le modèle. La plupart des paramètres d'entrée utilisables sont indiqués ci-dessous :

  - angles d'éclairement et nombre de directions utilisées pour discrétiser l'espace angulaire.
  - réflectance, transmittance, indices de réfraction et coefficients de rugosité (Vanderbilt *et al.* 1991) des différents types de feuilles présents.
  - réflectance du sol (lambertienne ou non) et modèle numérique de terrain, s'il y a du relief.
  - distribution spatiale, forme et densité foliaire des arbres. Cette dernière peut être représentée par le LAI (leaf area index : surface foliaire divisée par la surface au sol).

- dimensions et réflectance des troncs. Ces paramètres ont en général un rôle négligeable.
- hauteur et LAI du sous bois.
- dimension de la cellule élémentaire.

- ***Limites dues au temps de calcul et solutions.***

  La contrainte du temps de calcul est illustrée par l'exemple simple qui suit. Considérons une maquette représentant un chêne de dimensions moyennes (hauteur 15 m, diamètre 10,5 m) de la forêt de Fontainebleau, un découpage du milieu avec des cellules de 1,5 m de coté (soit 254 cellules de feuilles) et une discrétisation angulaire avec 100 directions. Une simple simulation dans la bande spectrale du vert nécessite un peu plus d'une minute sur une station de travail IBM RISK 6000. Cette maquette étant la plus petite que l'ont puisse utiliser pour simuler des FDRB de milieux forestiers (grâce à la multiplication informatique de la maquette), le temps minimal de simulation est donc supérieur à la minute. Imaginons que l'on veuille inverser le modèle DART par la méthode du simplexe avec des données multispectrales de type SPOT. En chaque point du simplexe, il est nécessaire de calculer la réflectance pour les trois canaux afin de déterminer l'erreur entre observations et simulations, soit 3 minutes par point. Si l'inversion est réalisée avec deux paramètres libres, la seule construction du simplexe (3 points) nécessite 9 minutes. Imaginons que le minimum de l'erreur soit trouvé au bout de 20 itérations (en général beaucoup plus), la solution est donc obtenue en 69 minutes. Cette méthode est peut-être envisageable pour traiter un pixel, mais certainement pas pour une image. Ainsi pour une image SPOT (1000 lignes $\times$ 1000 colonnes) de la forêt de Fontainebleau, l'inversion durerait un million d'heures, soit 114 années. Pour ces raisons, l'inversion directe du modèle DART n'a pas été envisagée. Deux solutions ont été étudiées :

  1 - A partir des simulations DART, on détermine une fonction analytique simple donnant la réflectance d'un milieu en fonction des paramètres recherchés.

  2 - On simule un nombre important de petites maquettes pour des valeurs discrètes des paramètres et on utilise une procédure d'interpolation pour calculer la réflectance entre ces valeurs discrètes.

  La première méthode a été utilisée avec succès dans le cadre de l'inversion d'images Landsat MSS au Burkina Faso. Elle n'est cependant pas directement généralisable. En

effet, les fonctions analytiques simples peuvent différer selon les milieux, les conditions d'acquisition et les paramètres recherchés. C'est pour cette raison qu'elle est présentée uniquement dans le chapitre consacré à cette étude particulière (*cf.* chapitre III).

L'autre méthode est plus générale. Elle est directement applicable à différents problèmes et différentes données. Un programme a été mis au point pour faciliter la mise en œuvre des différentes étapes de cette méthode. Il est présenté ici.

Mise au point d'une méthode d'inversion.

L'inversion est basée sur la représentation de la réflectance d'un paysage réel à partir de simulations DART. Ces simulations sont réalisées avec les maquettes simples, composées d'un minimum d'arbres, décrites dans le paragraphe suivant. Ce type de maquette a été choisi afin de minimiser le temps de calcul, le nombre de simulations constituant la table pouvant être de plusieurs milliers, mais aussi pour permettre une gestion la plus simple possible d'un paramètre important, le taux de recouvrement arboré. L'expression de la réflectance d'un paysage de caractéristiques données est obtenue par interpolation des valeurs de réflectance calculées sur des petites maquettes ayant des caractéristiques voisines de celles du paysage. Le nombre de valeurs de réflectance directionnelle ($\mathbf{\Omega}_s$, $\mathbf{\Omega}_v$) composant une FDRB entière étant infini, une fonction mathématique simple à 6 ou 8 paramètres a été utilisée pour permettre la représentation simple d'une FDRB et par suite l'obtention de la réflectance pour un couple quelconque ($\mathbf{\Omega}_s$, $\mathbf{\Omega}_v$). Toutes ces opérations sont décrites par l'organigramme de la Figure 0.2 et détaillées dans la suite du texte.

Un programme a été créé pour effectuer et traiter de manière automatique un nombre très important de simulations. Son but principal est la réalisation de l'inversion mais il s'avère également très utile pour effectuer des tests de sensibilité du modèle. Certaines de ces fonctions ont été développées spécialement pour ce dernier point. On peut distinguer deux étapes majeures dans le programme. La première concerne la saisie des paramètres d'entrée permettant la réalisation des simulations et la gestion de ces simulations (sauvegarde et accès aux résultats, ...). La deuxième concerne les outils de traitement des résultats afin d'arriver au but final qui est l'inversion.

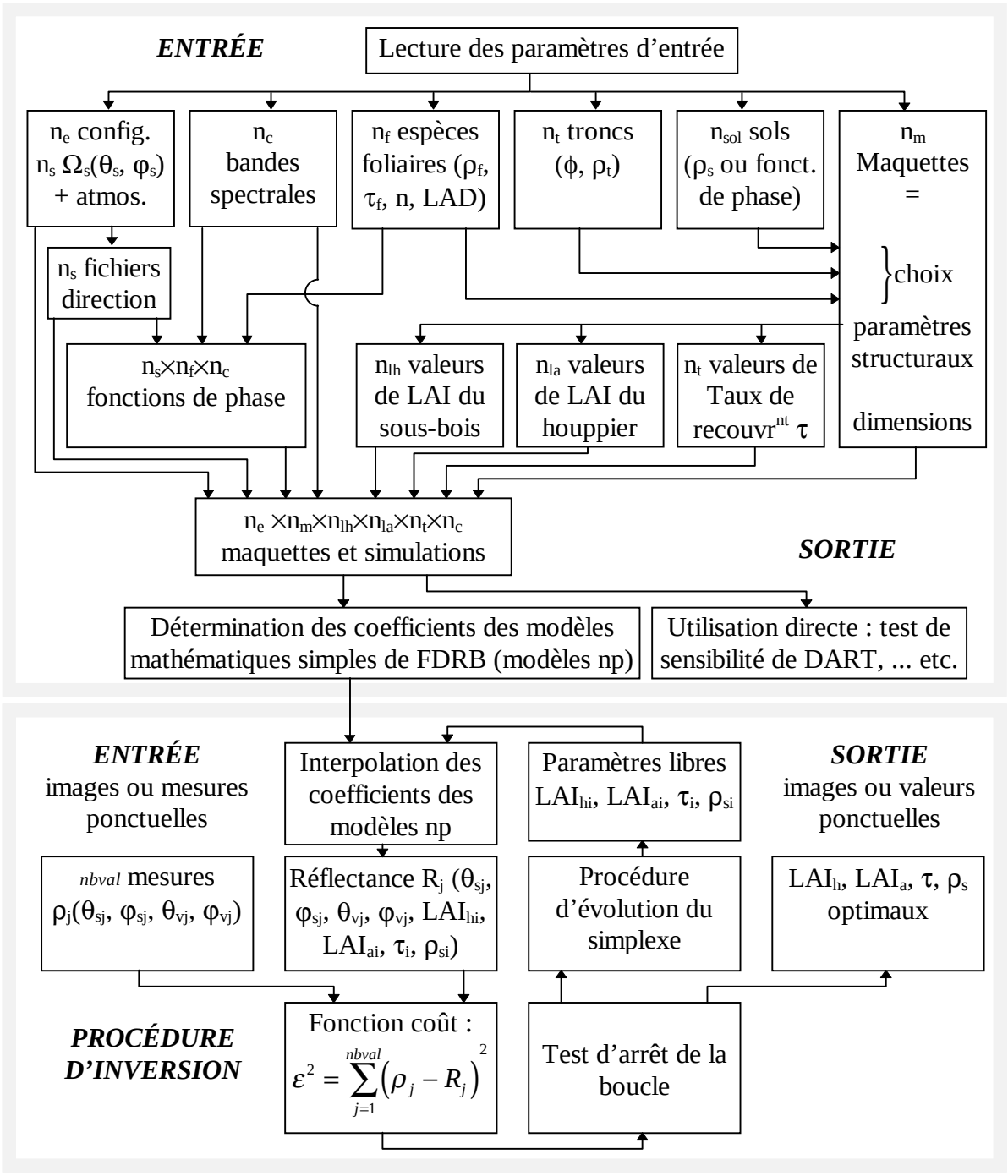


Figure 0.2 : Organigramme du programme d'inversion.

Les paramètres d'entrée du programme.

Leur saisie peut s'effectuer soit en mode interactif, soit à l'aide d'un fichier texte. Les paramètres nécessaires au fonctionnement du programme sont indiqués ci-dessous :

- ***Les bandes spectrales.***

  Saisie du nombre n_c de bandes spectrales et de leur nom.

- ***Les conditions d'éclairement.***

Saisie du nombre n_e de conditions d'éclairement et pour chacune :

- *Les angles d'éclairement (θ_s,φ_s).*
- *Le fichier des N directions discrètes ou création automatique de ce fichier.*
- *Le type d'atmosphère : pas d'atmosphère ou atmosphère isotrope avec le pourcentage de flux diffus dans chaque longueur d'onde.*

- ***Les différentes espèces foliaires.***

Saisie du nombre n_f d'espèces foliaires, de leurs noms et pour chacune :

- *Dans chaque bande spectrale :*
  - *La réflectance hémisphérique de la face inférieure.*
  - *La réflectance hémisphérique de la face supérieure.*
  - *La transmittance hémisphérique.*
  - *Le coefficient de réfraction de la face inférieure.*
  - *La rugosité de la face inférieure.*
  - *Le coefficient de réfraction de la face supérieure.*
  - *La rugosité de la face supérieure.*
- *La distribution angulaire foliaire.*
- *La taille des feuilles.*

- ***Les différents sols.***

Saisie du nombre n_{sol} de types de sol et pour chacun :

- *Le nom.*
- *Le type (lambertien, fonction de Hapke).*
- *Le relief (si oui, saisie du nom du fichier « modèle numérique de terrain »).*
- *Dans chaque bande spectrale : la réflectance lambertienne ou les paramètres de la fonction de Hapke.*

- ***Les troncs.***

Saisie du nombre n_{tronc} de types de tronc et pour chacun :

- *Le nom.*
- *Dans chaque canal la réflectance hémisphérique.*

- ***Les maquettes.***

L'opérateur a la possibilité d'utiliser quatre types de maquette en fonction de ses besoins.

1 - Les maquettes de type herbe.

Il s'agit de maquettes constituées d'un sol nu avec une couverture herbeuse égale à 25 ou 100%. D'autres valeurs peuvent être obtenues si la couverture herbeuse est caractérisée par une hauteur moyenne et un écart type supérieur à cette hauteur.

Saisie du nombre de maquettes de type herbe et pour chacune :

- *Dimensions de la cellule élémentaire.*
- *Choix du sol parmi les n_{sol} définis précédemment.*
- *Choix du type de recouvrement 100% ou 25%.*
- *Choix de l'espèce foliaire parmi les n_f définies précédemment.*
- *Hauteur et écart type de l'herbe.*
- *Nombre n_{lh} de valeurs de LAI et valeurs.*

2 - Les maquettes de type « arbre ».

Il s'agit d'un arbre sur une surface carrée de dimension variable ce qui permet d'obtenir un taux de recouvrement variable. La scène simulée est en réalité une scène infinie obtenue par duplication informatique de la maquette (Figure 0.3).

Saisie du nombre de maquettes de type arbre et pour chacune :

- *Dimensions de la cellule élémentaire.*
- *Choix du sol parmi les n_{sol} définis précédemment.*
- *Choix de l'espèce foliaire du sous-bois parmi les n_f définies précédemment.*
- *Hauteur et écart type du sous-bois.*
- *Nombre n_{lh} de valeurs de LAI du sous-bois et valeurs.*
- *Choix du tronc parmi les n_{tronc} définis précédemment.*
- *Choix de l'espèce foliaire de l'arbre parmi les n_f définies précédemment.*
- *Nombre n_{la} de valeurs de LAI de l'arbre et valeurs (choix de l'unité utilisée : valeurs positives pour le LAI (m^2/m^2) et négatives pour la densité foliaire (m^2/m^3) des cellules de type feuille).*
- *Hauteur du tronc.*
- *Hauteur du tronc dans le houppier.*
- *Diamètre du tronc.*
- *Forme du houppier : ellipse, ellipse composée, cône, trapèze ou cône composé.*
- *Dimensions du houppier selon la forme.*

- *Nombre n_t de taux de recouvrement et pour chacun largeur de la bande de sous-bois à ajouter autour de la maquette de taux de recouvrement unité. La valeur de cette largeur de bande définit la valeur du taux de recouvrement.*

La scène simulée par cette maquette est une scène infinie avec des arbres espacés régulièrement. En dessous d'un certain taux de recouvrement (lorsque les arbres ne sont plus jointifs), il apparaît des bandes infinies de sol. La FDRB de tels milieux présente alors des caractéristiques très particulières suivant les directions de ces bandes infinies. Cet effet, observable dans le cas de plantations régulières, n'est en général pas présent dans le cas de milieux naturels. Le type de maquette présenté ci-dessous permet de remédier à cette difficulté tout en conservant un nombre réduit d'arbres.

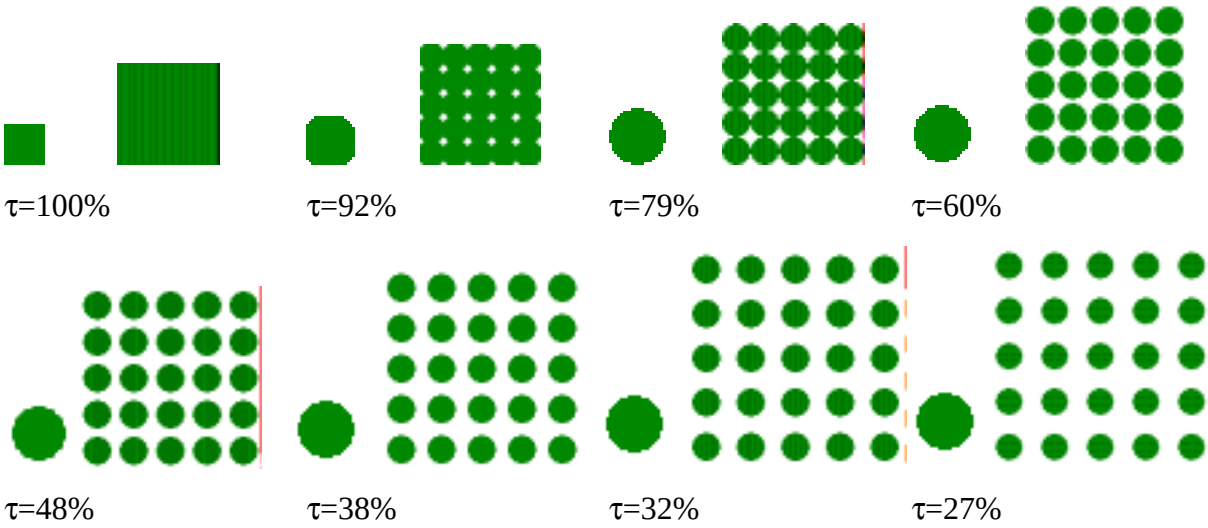


Figure 0.3 : Maquettes « arbre » élémentaires et scènes simulées (en réalité infinies) pour des taux de recouvrement de 100% à 27%.

3 - Les maquettes « 4 arbres ».

Ces maquettes ont été créées de manière à ce que lors d'une visée très oblique un observateur ne puisse voir le sol, jusqu'à un taux de recouvrement le plus faible possible. Elles sont constituées de 4 arbres répartis sur une surface carrée (Figure 0.4). Différents taux de recouvrement sont obtenus à partir de la variation d'un seul paramètre (comme pour la maquette de type « arbre »). Ce dernier permet de calculer le déplacement de 3 des 4 arbres à partir de la position initiale (taux de recouvrement 100%).

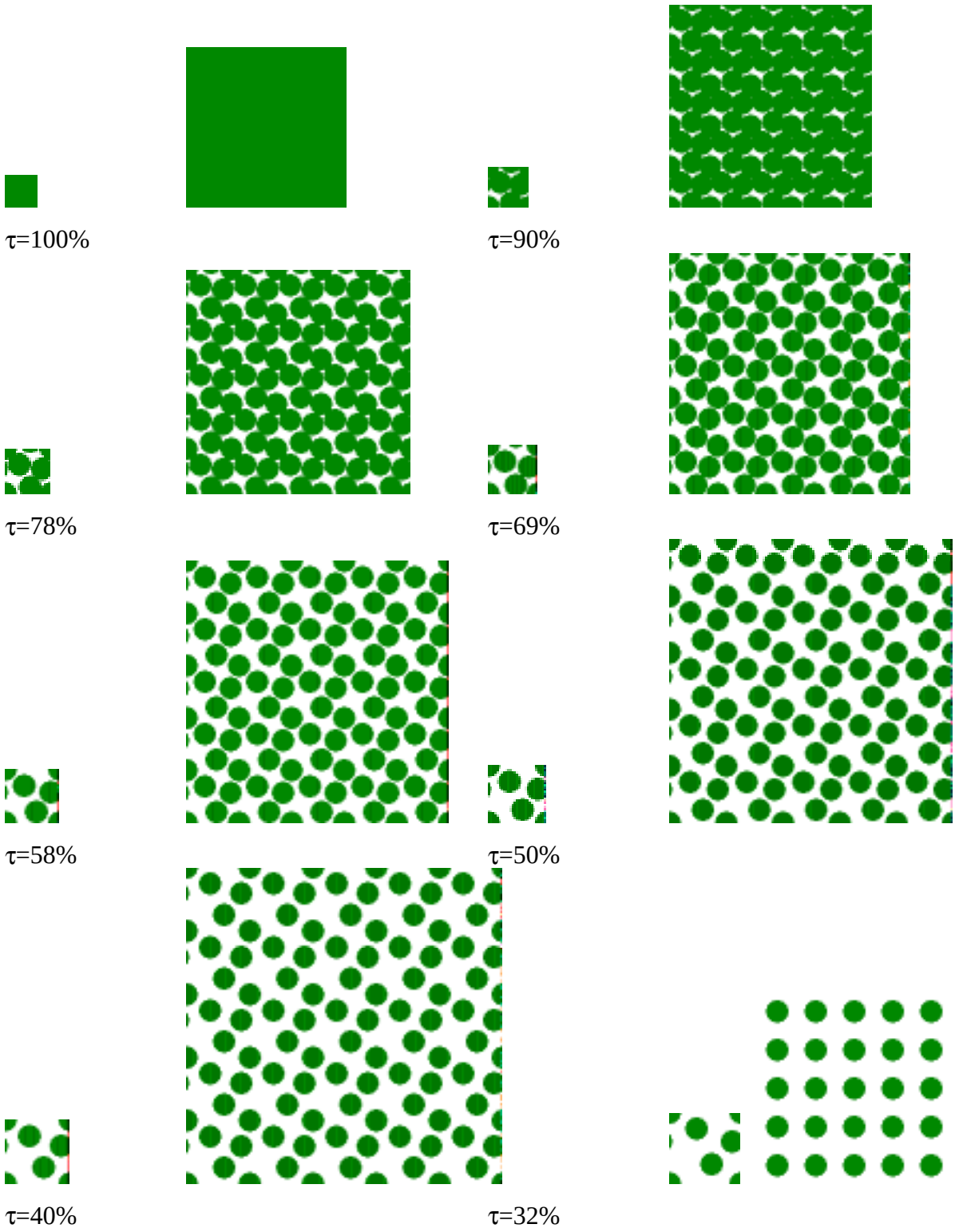


Figure 0.4 : Maquettes « 4 arbres » élémentaires et scènes simulées (en réalité infinies) pour des taux de recouvrement de 100% à 32%

Saisie du nombre de maquettes à 4 arbres et pour chacune :

- *Dimensions de la cellule élémentaire.*
- *Choix du sol parmi les n_{sol} définis précédemment.*
- *Choix de l'espèce foliaire du sous-bois parmi les n_f définies précédemment.*

- *Hauteur et écart type du sous-bois.*
- *Nombre n_{lh} de valeurs de LAI du sous-bois et valeurs.*
- *Choix du tronc parmi les n_{tronc} définis précédemment.*
- *Choix de l'espèce foliaire des arbres parmi les n_f définies précédemment.*
- *Nombre n_{la} de valeurs de LAI des arbres et valeurs (choix de l'unité utilisée : valeurs positives pour le LAI (m^2/m^2) et négatives pour la densité foliaire (m^2/m^3) des cellules de type feuille).*
- *Hauteur du tronc.*
- *Hauteur du tronc dans le houppier.*
- *Diamètre du tronc.*
- *Forme du houppier : ellipse, ellipse composée, cône, trapèze ou cône composé.*
- *Dimensions du houppier selon la forme.*
- *Nombre n_t de taux de recouvrement et pour chacune largeur de la bande de sous-bois à ajouter à la maquette de taux de recouvrement unité.*

4 - Les maquettes de type scène.

Ces maquettes sont celles utilisées de manière classique avec le modèle DART. Elles permettent de représenter un paysage réel de la manière la plus fidèle possible. Les résultats de simulation avec ces maquettes se rapprochent donc au mieux de la réalité pour un paysage dont les caractéristiques sont connues. Cependant, les temps de calcul sont évidemment beaucoup plus longs que ceux des maquettes précédentes.

Saisie du nombre de maquettes de type scène et pour chacune :

- *Si description par fichier : nom du fichier.*
- *Dimensions de la cellule élémentaire.*
- *Choix du sol parmi les n_{sol} définis précédemment.*
- *Choix de l'espèce foliaire du sous-bois parmi les n_f définies précédemment.*
- *Hauteur et écart type du sous-bois.*
- *Nombre n_{lh} de valeurs de LAI du sous-bois et valeurs.*
- *Nombre d'espèces d'arbre et pour chacune :*
    - *Choix de l'espèce foliaire parmi les n_f définies précédemment.*
    - *Choix du tronc parmi les n_{tronc} définis précédemment.*
- *Nombre n_{la} de valeurs de LAI et valeurs pour chaque espèce (choix de l'unité utilisée : valeurs positives pour le LAI (m^2/m^2) et négatives pour la densité foliaire (m^2/m^3) des cellules de type feuille).*
- *Nombre d'arbres et si saisie en interactif pour chacun :*

- *Espèce, position, forme et dimension.*
- *Nombre n_t de valeurs du facteur de dilatation des houppiers et valeurs. Le facteur de dilatation permet de faire varier le taux de recouvrement.*

- ***Différentes possibilités de variation des paramètres.***

  Le programme autorise la variation des conditions d'éclairement (angle d'éclairement et proportion du rayonnement diffus atmosphériques) ainsi que l'utilisation de plusieurs bandes spectrales et de plusieurs maquettes.

  Dans ces maquettes, on peut faire varier le LAI du sous bois, le LAI du houppier et le taux de recouvrement soit par la largeur de la bande de sous-bois autour du houppier pour les maquettes de type « arbre » et « 4 arbres », soit par dilatation des houppiers pour les maquettes de type scène. Le LAI peut aussi être donné sous la forme de densité foliaire en m^{-1}. Ce dernier paramètre a l'avantage d'être une caractéristique de l'arbre et non pas une caractéristique de la scène comme le LAI (qui dépend de la densité foliaire et du taux de recouvrement). Pour cette raison, c'est ce paramètre qui a été employé lors de l'utilisation de la procédure d'inversion.

  La possibilité de créer plusieurs maquettes, par exemple de type arbre, permet la variation d'un paramètre supplémentaire choisi parmi les paramètres d'entrée, par exemple la réflectance du sol ou bien celle des feuilles.

- ***Avantages et inconvénients des différents types de maquette.***

  La réflexion sur la représentation d'un paysage arboré a donc conduit à la création de trois types de maquettes possibles. Ce paragraphe présente différentes comparaisons et analyses qui peuvent permettre à l'utilisateur de choisir en fonction de ses besoins le type de maquette le plus approprié.

  Les maquettes les plus faciles à utiliser sont celles de type arbre et de type 4 arbres. Il suffit de connaître les dimensions moyennes d'un arbre. La variation du taux de recouvrement est de plus très facile à mettre en œuvre. La maquette de type arbre présente le temps de calcul le plus court par rapport aux autres maquettes. Son seul inconvénient est sa particularité géométrique. En effet, la répartition aléatoire des arbres dans un paysage réel augmente la surface apparente des arbres en visée oblique, par rapport à un paysage régulier tel que celui simulé pour une maquette de type scène. Ce phénomène est particulièrement important aux grands angles de visée. Ainsi, lors d'une visée horizontale d'un paysage

relativement plat, l'horizon paraît complètement bouché par les arbres à partir d'un taux de recouvrement peu élevé (Figure 0.5).

Une solution à ce problème consiste à créer une maquette avec un nombre d'arbres plus important répartis de manière aléatoire. A partir de combien d'arbres peut on être sûr de ne pas introduire de particularité? Et surtout comment s'en assurer? Un test possible est d'observer la FDRB obtenue pour un éclairement à la verticale. Elle doit en effet présenter une symétrie axiale si la maquette ne présente pas de particularité géométrique. Une solution consisterait à créer des paysages types pour différents taux de recouvrement et différentes dimensions de houppier en s'assurant de la symétrie de la FDRB pour un éclairement vertical. De plus, cette maquette devrait être réalisée en minimisant le nombre d'arbres afin d'obtenir des temps de simulations les plus courts possibles. Compte tenu de la difficulté de ce travail, nous avons mis au point la maquette « 4 arbres » décrites ci-dessus. Elle permet de palier aux inconvénients de la maquette « arbre » tout en en conservant ses avantages.

Les maquettes de type « scène » ont été créées pour permettre d'effectuer des tests de sensibilité du modèle DART, sur des maquettes se rapprochant le plus possible d'un paysage réel. Elles peuvent également servir à l'inversion. Cependant la gestion du taux de recouvrement est alors plus difficile et le temps de simulation augmente avec le nombre d'arbres (cellules pleines) présents.



Figure 0.5 : Savane arbustive au Burkina Faso. L'horizon est bouché par les arbustes alors que le taux de recouvrement ne dépasse pas 20%. (Photo Fontès 1994)

- ***Comparaison entre les FDRB de type « arbre » et « 4 arbres ».***

  Les Figure 0.7 à Figure 0.10 représentent des FDRB simulées pour des maquettes « arbre » et « 4 arbres ». Les différentes directions de visée sont représentées en abscisse. Le maximum de réflectance est obtenu dans la direction du « hot spot » correspondant à la direction solaire ascendante. Les simulations sont celles utilisées pour l'inversion de données SPOT sur la forêt de Fontainebleau. Les caractéristiques foliaires utilisées sont celles du chêne (Figure 0.6), mesurées lors de cette campagne (Demarez 1997). Le houppier est un ellipsoïde de hauteur 15 m et de diamètre 10,5 m, sans tronc. La discrétisation utilisée est un cube de 1,5 m de coté. Le sol est lambertien, il n'y a pas de sous-bois.

bande spectrale	réflectance face supérieure	réflectance face inférieure	transmittance
vert	17%	25%	20%
rouge	10%	6%	5%
PIR	45%	45%	45%

Figure 0.6 : Caractéristiques foliaires du chêne mesurées à Fontainebleau (Demarez, 1997).

Les FDRB obtenues avec une maquette de type « arbre » ou « 4 arbres » sont peu différentes pour des taux de recouvrement importants (Figure 0.7 et Figure 0.8). Ceci correspond à des maquettes où les arbres sont jointifs (paysage bouché) sur la maquette de type « arbre ». Si cette dernière condition n'est plus respectée, il apparaît, dans le plan d'incidence, des bandes de sol nu éclairé qui ont pour effet d'augmenter fortement la réflectance dans ce même plan (Figure 0.9 et Figure 0.10). Avec la maquette de type « 4 arbres », ce phénomène intervient pour des taux de recouvrement beaucoup plus faibles, puisque les 4 arbres sont placés de telle manière que l'horizon soit le plus bouché possible.

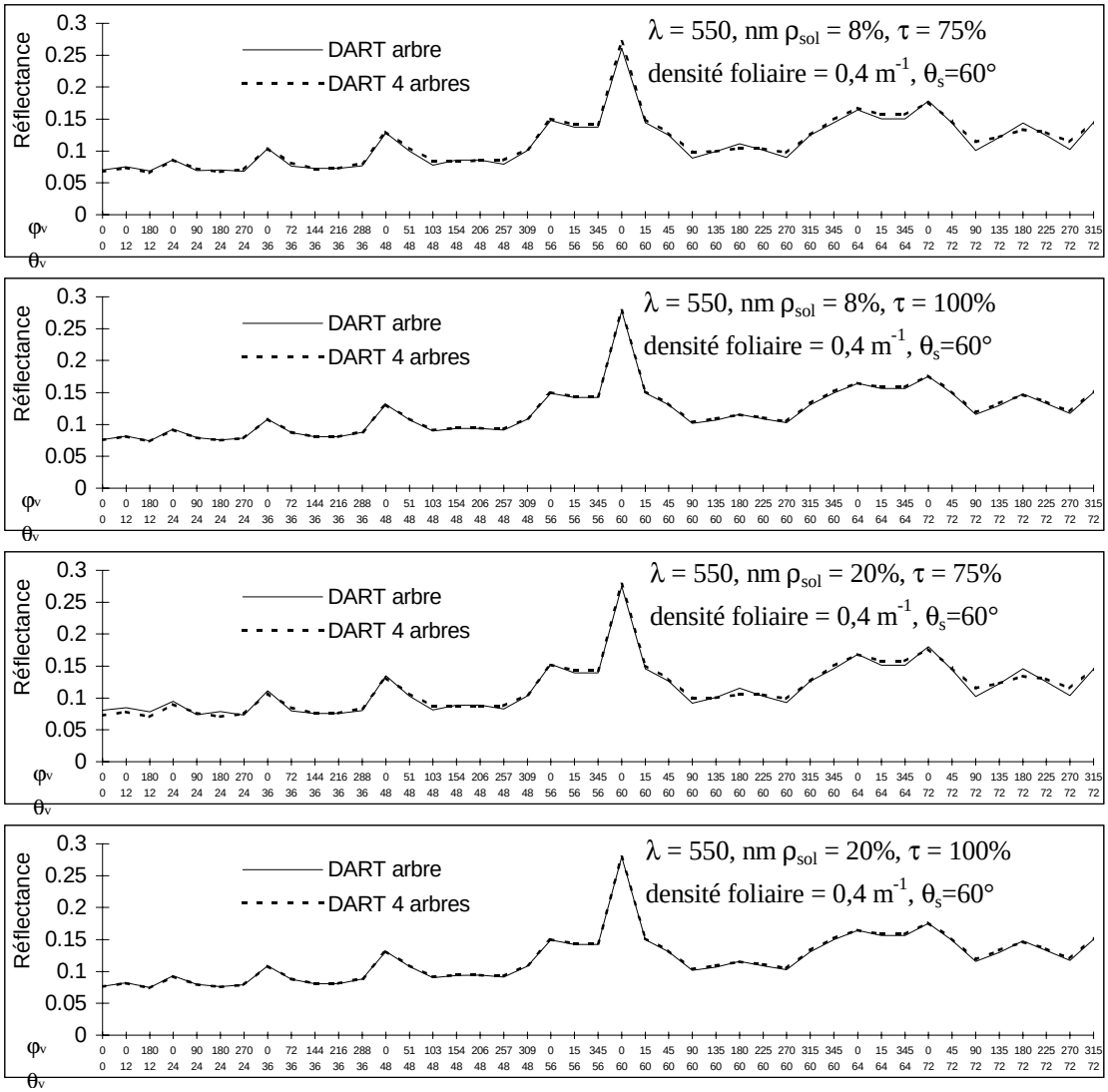


Figure 0.7 : Comparaison entre FDRB obtenues avec une maquette de type « arbre » et « 4 arbres » pour 2 valeurs de taux de recouvrement (100% et 75%) et deux valeurs de réflectance du sol (8% et 20%).

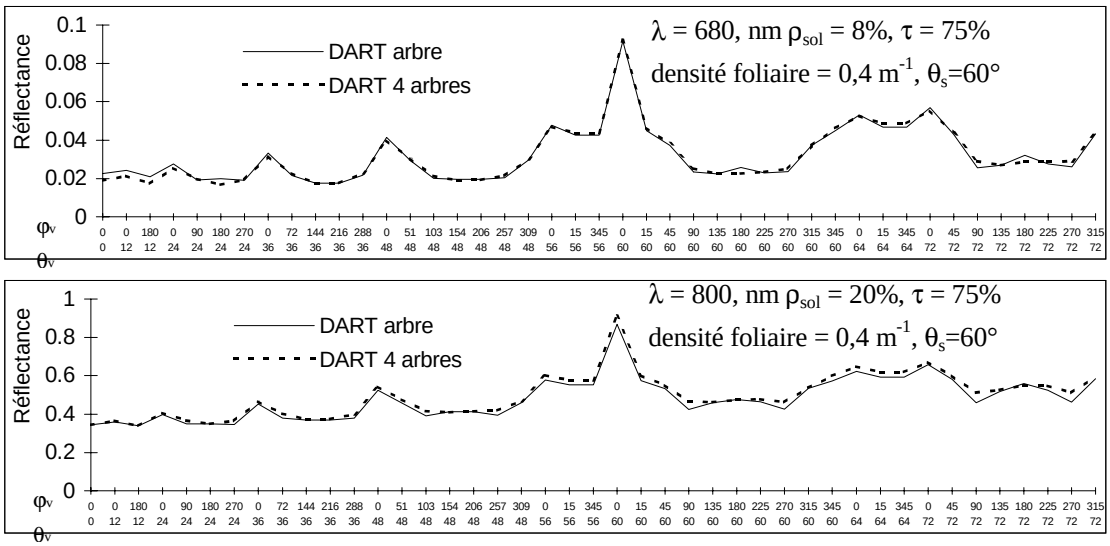


Figure 0.8 : Comparaison entre FDRB obtenues avec une maquette de type « arbre » et « 4 arbres » pour les bandes spectrales rouge (λ = 680 nm) et proche infrarouge (λ = 800 nm).

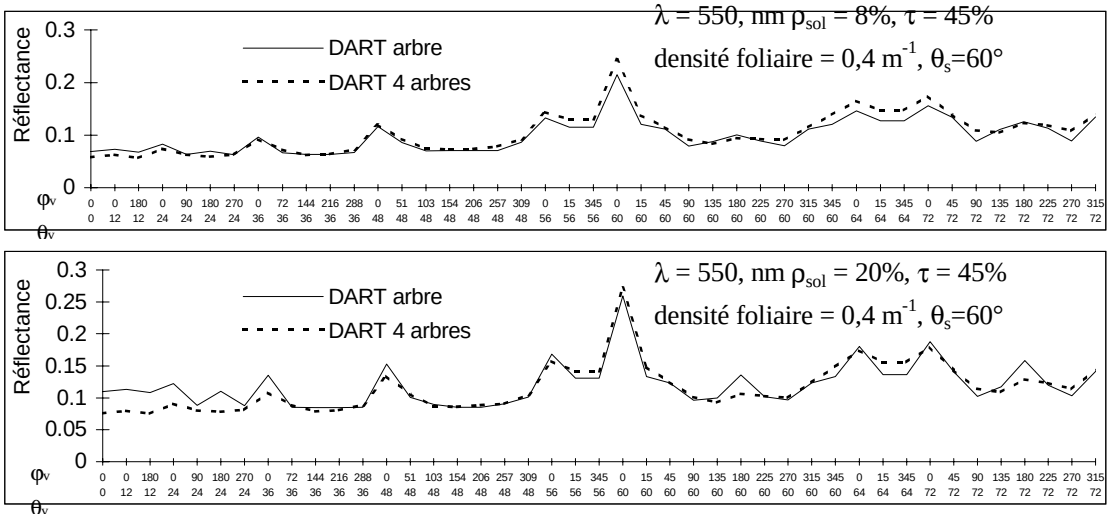


Figure 0.9 : Comparaison entre FDRB obtenues avec une maquette de type « arbre » et « 4 arbres ». Le taux de recouvrement de 45% implique des différences non négligeables.

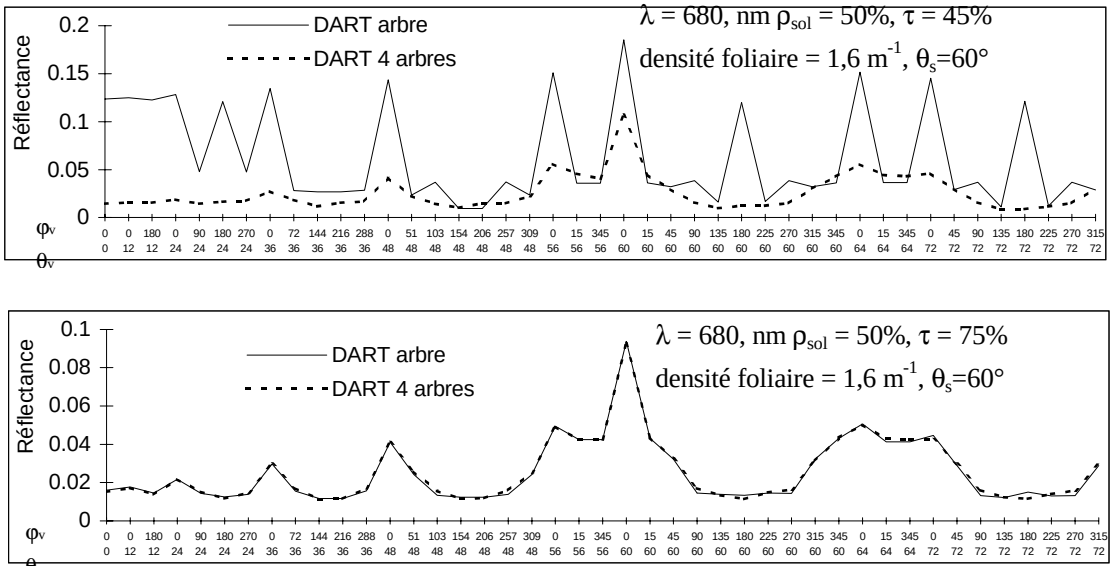


Figure 0.10 : Comparaison entre FDRB obtenues avec une maquette de type « arbre » et « 4 arbres ». Elles diffèrent beaucoup pour un taux de recouvrement de 45% et une réflectance du sol importante (50%). Elles redeviennent semblables en augmentant le taux de recouvrement à 75%.

Mise en place des différentes simulations.

Les différentes étapes du programme d'inversion sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

- ***Création des différents répertoires.***

  Après lecture du fichier des paramètres d'entrée ou leur saisie en interactif, le programme commence par créer une arborescence sur les différents paramètres variants (Figure 0.11). Il crée ainsi n_s répertoires pour les fichiers direction, $n_s \times n_f \times n_c$ répertoires pour les fichiers de fonction de phase et $n_s \times n_m \times n_{lh} \times n_{la} \times n_t \times n_c$ répertoires pour les simulations.

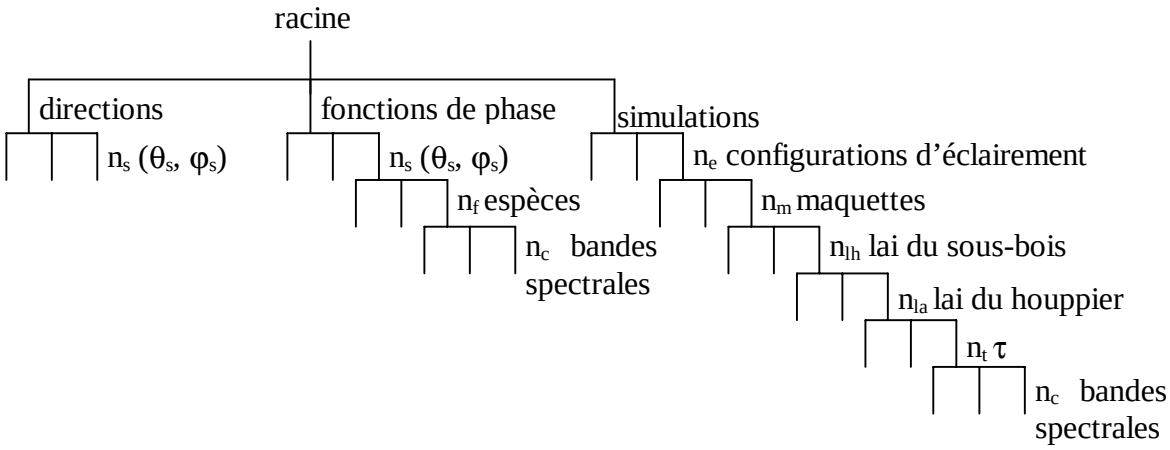


Figure 0.11 : Architecture des répertoires de stockage.

- ***Création des fichiers direction.***

  Le modèle DART a besoin d'un fichier décrivant la discrétisation de l'espace angulaire : c'est à dire pour chaque direction discrète, la valeur des angles zénithal θ_i et azimutal φ_i ainsi que de l'angle solide autour de cette direction $\Delta\Omega_i$. L'opérateur peut utiliser l'option de création automatique de ce fichier. La discrétisation de l'espace angulaire (Figure 0.12) est alors effectuée en respectant les contraintes suivantes :

  - L'espace angulaire doit être découpé de la manière la plus régulière possible. La discrétisation suivant les angles zénithaux est cependant plus fine que celle suivant les angles azimutaux.
  - La direction verticale ascendante et la direction solaire ascendante (« hot spot ») doivent faire parti des directions discrètes.
  - Les directions doivent être éloignées le plus possible de l'horizontale afin d'éviter que les trajets de propagation des rayons ne deviennent trop longs.

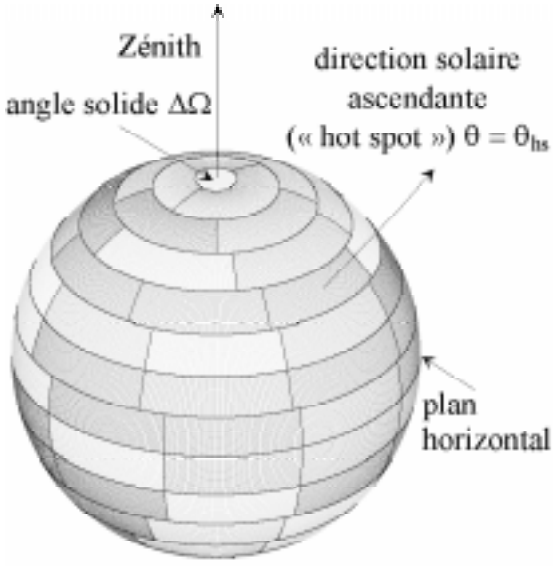


Figure 0.12 : Exemple de discrétisation de l'espace des directions avec 88 directions et sans discrétisation plus fine autour de la direction du « hot spot ». θ_s=45°, φ_s=0°.

La discrétisation de l'espace des directions est réalisée à l'aide des étapes suivantes :

1) Nombre approximatif de directions *nbdir* est fixé à 80. Suite aux arrondis successifs, on obtient un nombre de directions final supérieur à 90.
2) Calcul de l'angle solide élémentaire $\Delta\Omega = \frac{4\pi}{nbdir}$.

3) Calcul du pas de discrétisation $\Delta\theta$. Autour de la direction verticale l'angle zénithal θ varie entre 0 et $\Delta\theta$. L'angle azimutal φ varie entre 0 et 2π. L'angle solide autour de cette direction peut donc s'écrire : $\Delta\Omega = 2\pi \times \left(\cos(0) - \cos(\Delta\theta)\right)$, d'où la valeur de $\Delta\theta$: $\Delta\theta = \arccos\left(1 - \frac{\Delta\Omega}{2\pi}\right)$. Une discrétisation en θ et en φ identique donnerait une valeur de pas deux fois plus importante. Nous avons volontairement choisi une discrétisation en θ plus fine.

4) Découpage de l'espace des directions selon θ avec un pas le plus proche possible de $\Delta\theta$. Ce premier calcul permet d'obtenir la discrétisation en θ.

   4.a) Calcul du nombre de secteurs angulaires de largeur $\Delta\theta_1$, compris entre $\theta = \theta_{hs} - \frac{\Delta\theta_1}{2}$ et θ = 90°. L'angle zénithal du « hot spot » θ_{hs} (ou angle zénithal de la direction solaire ascendante) est au centre du premier secteur angulaire $\left[\theta_{hs} - \frac{\Delta\theta_1}{2}; \theta_{hs} + \frac{\Delta\theta_1}{2}\right]$.

   4.b) Calcul du nombre de secteurs angulaires de largeur $\Delta\theta_2$, compris entre θ = 0° et $\theta = \theta_{hs} - \frac{\Delta\theta_1}{2}$.

   4.c) Calcul du nombre de secteurs angulaires de largeur $\Delta\theta_3$, compris entre θ = 90° et θ = 180°.

5) Tout secteur (θ_i, 2π) est discrétisé selon φ pour obtenir des angles solides les plus proches possibles de $\Delta\Omega$ calculé au 2).

6) Une rotation du secteur angulaire (θ_{hs}, 2π) est réalisée afin que la direction du « hot spot » fasse partie des directions discrètes. Une option permet une discrétisation automatique plus fine autour de cette direction. Celle-ci est réalisée en divisant l'angle solide en 9 secteurs angulaires.

- ***Calcul des fonctions de phase.***

  Les $n_e \times n_f \times n_c$ fonctions de phase sont calculées avec le programme *phase*.

- ***Création des maquettes.***

La création des $n_e \times n_m \times n_{lh} \times n_{la} \times n_t \times n_c$ maquettes est réalisée par l'exécution automatique du programme *maket*. Le taux de recouvrement et le LAI de chaque maquette sont alors calculés et stockés pour une utilisation ultérieure.

- ***Simulations DART.***

  Les $n_e \times n_m \times n_{lh} \times n_{la} \times n_t \times n_c$ simulations DART sont réalisées pour chaque maquette calculée précédemment en utilisant les fonctions de phase et le fichier directions approprié.

- ***Lancement de l'ensemble des opérations.***

  L'ensemble des opérations se déroule simultanément à l'exécution du programme excepté le calcul des fonctions de phase et les simulations elles-mêmes. Cette dernière opération étant relativement longue, l'opérateur peut lancer son exécution en traitement par lot (« batch » en anglais), à l'aide d'un fichier texte contenant toutes les informations nécessaires.

Traitement des simulations.

Pour effectuer l'inversion, la procédure doit pouvoir disposer de la réflectance du couvert pour tout ensemble de valeurs des paramètres d'entrée dans la gamme de variation considérée. En effet, un algorithme tel que le simplexe s'approche pas à pas de la solution recherchée en parcourant si nécessaire tout le domaine de variation des paramètres. Compte tenu de la contrainte liée au temps de calcul, le programme utilise un nombre limité de simulations précalculées pour des valeurs discrètes des paramètres. Les résultats, stockés dans une table, sont utilisés en entrée d'une procédure d'interpolation. Pour des paramètres tels que le LAI ou le taux de recouvrement ceci ne pose pas de problème. Par contre pour les angles d'éclairement et en raison du phénomène de « hot spot », il n'est pas possible d'utiliser cette méthode (Figure 0.13). On ne peut pas reconstituer la FDRB d'un paysage pour une valeur Ω_{s1} de l'angle solaire à partir de simulations pour des valeurs voisines Ω_{s2} et Ω_{s3}.

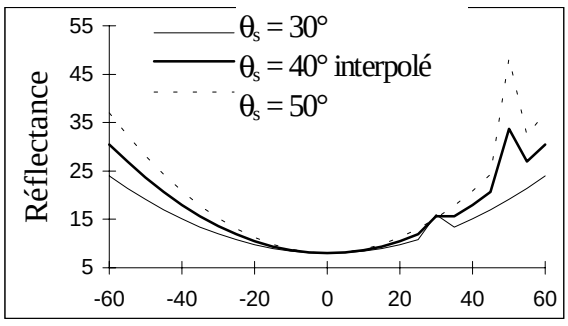


Figure 0.13 : Interpolation directe en θ_s de courbes de réflectance bidirectionnelle.

En ce qui concerne les angles de visée, une interpolation est possible, bien que difficile et surtout coûteuse en temps de calcul compte tenu de la discrétisation angulaire difficile à réaliser. Pour résoudre ce problème nous avons fait passer au mieux une surface à 6 (ou 8) paramètres c_i par les valeurs de réflectance de chaque FDRB simulée. Il est important de noter qu'à chaque simulation, c'est à dire à chaque jeu de paramètres d'entrée, correspond une fonction analytique différente, soit un jeu de 6 (ou 8) paramètres c_i. Ce modèle est présenté ci-dessous.

- ***Un modèle de réflectance bidirectionnelle à 6 (ou 8) paramètres.***

  La fonction à 6 paramètres est la suivante :

$$R(\theta_v, \Delta\varphi_{sv}) = \left(c_1 + c_2\theta_v \cos(\Delta\varphi_{sv}) + c_3\theta_v^2 \cos^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_4\theta_v^2 \sin^2(\Delta\varphi_{sv})\right) \times \left(1 + c_5 \exp\left(\frac{-\psi_{sv}^{\ 2}}{c_6^2}\right)\right)$$

  $\Delta\varphi_{sv} = \varphi_s - \varphi_v$, $\cos(\psi_{sv}) = \Omega_s . \Omega_v$

  Le terme $\left(1 + c_5 \exp\left(\frac{-\psi_{sv}^{\ 2}}{c_6^2}\right)\right)$ représente le hot spot, c_5 étant la hauteur, c_6 la largeur. Le reste de la fonction est une fonction « bol » classique, symétrique par rapport au plan d'incidence. Cette fonction a été choisie après analyse de différentes FDRB simulées. Elle fournit une bonne approximation. Cependant, certaines FDRB présentant une augmentation très forte de la réflectance dans le plan d'incidence ne peuvent pas être bien représentées par cette fonction. Pour résoudre ce problème, le degré du polynôme en $\theta_{v,i} \sin(\Delta\varphi_{sv,i})$ a été augmenté avec l'ajout des termes de degré 4 et 6. Il s'agit de degrés pairs afin de conserver la symétrie par rapport au plan d'incidence. La fonction à 8 paramètres s'écrit alors :

$$R(\theta_v, \Delta\varphi_{sv}) = \left(c_1 + c_2\theta_v \cos(\Delta\varphi_{sv}) + c_3\theta_v^2 \cos^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_4\theta_v^2 \sin^2(\Delta\varphi_{sv}) + c_5\theta_v^4 \sin^4(\Delta\varphi_{sv}) + c_6\theta_v^6 \sin^6(\Delta\varphi_{sv})\right) \times \left(1 + c_7 \exp\left(\frac{-\psi_{sv}^{\ 2}}{c_8^2}\right)\right)$$

  Cette fonction permet de mieux représenter les FDRB particulières, mais n'est pas plus précise pour les autres cas.

  Les c_i sont calculés pour chaque canal, angle solaire et valeur de paramètre libre par la méthode des moindres carrés. Le calcul s'effectue de la même manière pour les fonctions à 6 ou 8 paramètres. Les étapes utilisées avec la fonction à 6 paramètres sont indiquées ci-dessous :

  1) Initialisation du terme c_5 à 0 et du terme c_6 à 1.

2) Répéter les opérations suivantes :

a) Calcul des termes c_1 à c_4 par la méthode des moindres carrées en minimisant la fonction coût :

$$\varepsilon_{bol}^2 = \sum_{i=1}^{nbdir} \left(\frac{p_i \times \rho_{s,i}}{1 + c_5 \exp\left(\frac{-\psi_{sv,i}^{\ 2}}{c_6^2} \right)} - p_i \times \left(c_1 + c_2 \theta_{v,i} \cos\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) + c_3 \theta_{v,i}^2 \cos^2\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) + c_4 \theta_{v,i}^2 \sin^2\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) \right) \right)^2$$

avec *nbdir* le nombre de directions du fichier FDRB simulé et $\rho_{s,i}$ la réflectance simulée par le modèle DART pour la i^{ème} direction. p_i est le poids affecté à la direction *i*. Afin de privilégier les directions proches du nadir nous avons utilisé les valeurs de poids suivantes: $p_i = \sqrt{100 - \theta_{v,i}}$ avec $\theta_{v,i}$ en degré. De même le fait de diviser dans le calcul de l'erreur ε^2_{bol} les réflectances réelles par le terme de « hot spot » permet de ne pas favoriser les valeurs voisines du « hot spot ». Les coefficients c_1 à c_4 sont déterminés à partir du système linéaire d'équations : $\frac{\partial \varepsilon_{bol}^2}{\partial c_j} = 0 \ \forall \ j \in \{1,2,3,4\}$. Ce système est résolu par la méthode classique du pivot de Gauss.

b) Calcul du terme c_5 correspondant à la hauteur du hot spot. Il suffit de résoudre l'équation :

$$\rho_{s,k} = \left(c_1 + c_2 \theta_{v,k} \cos\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_3 \theta_{v,k}^2 \cos^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_4 \theta_{v,k}^2 \sin^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) \right) \times \left(1 + c_5 \exp\left(\frac{-\psi_{sv,k}^{\ 2}}{c_6^2} \right) \right)$$

avec *k* le numéro de la direction correspondant au hot spot. Or $\psi_{sv,k} = 0$, l'équation devient donc :

$$\rho_{s,k} = \left(c_1 + c_2 \theta_{v,k} \cos\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_3 \theta_{v,k}^2 \cos^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_4 \theta_{v,k}^2 \sin^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) \right) \times \left(1 + c_5 \right)$$

d'où :

$$c_5 = \frac{\rho_{s,k}}{c_1 + c_2 \theta_{v,k} \cos\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_3 \theta_{v,k}^2 \cos^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right) + c_4 \theta_{v,k}^2 \sin^2\left(\Delta\varphi_{sv,k}\right)} - 1$$

c) Calcul du terme c_6 correspondant à la largeur du hot spot. Il s'effectue par minimisation de l'erreur :

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbdir} \left(\rho_{s,i} - \left(c_1 + c_2 \theta_{v,i} \cos\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) + c_3 \theta_{v,i}^2 \cos^2\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) + c_4 \theta_{v,i}^2 \sin^2\left(\Delta\varphi_{sv,i}\right) \right) \times \left(1 + c_5 \exp\left(\frac{-\psi_{sv,i}^{\ 2}}{c_6^2} \right) \right) \right)^2$$

La minimisation est réalisée par la méthode de Brent (Brent *et al.* 1973) dont la programmation est extraite de *numerical recipies in C*. Cette méthode permet la recherche du minimum à l'intérieur d'un intervalle [a,b] en utilisant une approche pas à pas accélérée, quand c'est possible, par l'interpolation parabolique inverse.

3) Fin de la procédure itérative lorsque l'évolution des termes c_5 et c_6 et de la fonction coût ε^2 devient inférieure à un seuil.

Pour calculer la réflectance pour des valeurs quelconques de paramètres (LAI, τ, etc), il suffit alors d'interpoler les coefficients c_i et d'utiliser ensuite la fonction analytique obtenue avec ces nouvelles valeurs de coefficients.

La fonction de FDRB à 6 (ou 8) paramètres ainsi obtenue permet de représenter de façon satisfaisante la plupart des FDRB simulées. Les Figure 0.14 à Figure 0.18 représentent des résultats issus des simulations utilisées dans le paragraphe sur la comparaison entre les maquettes « arbre » et « 4 arbres ». La maquette utilisée est de type « arbre ». Le RMSE donné sur les figures pour le modèle à 6 (ou 8) paramètres indique l'erreur par rapport à la simulation DART.

La Figure 0.14 permet de comparer les FDRB simulées directement avec DART et celles obtenues avec les modèles à 6 et 8 paramètres dans le canal vert pour 3 valeurs du taux de recouvrement : 45%, 75% et 100%. La Figure 0.15 montre les mêmes résultats pour une valeur de réflectance du sol plus forte. Les résultats sont satisfaisants dans l'ensemble et nous permettent de penser que ce modèle à 6 (ou 8) paramètres peut être utilisé pour représenter une FDRB. Cependant on peut noter que pour une valeur du taux de recouvrement de 45%, les résultats sont un peu moins bons, en particulier pour les fortes réflectances du sol et pour le modèle à 6 paramètres. Une analyse de ce phénomène ainsi qu'une solution sont proposées plus loin.

La Figure 0.16 indique que les résultats pour les canaux rouge et proche infrarouge sont tout aussi satisfaisants que ceux obtenus pour le canal vert.

La Figure 0.17 montre un cas où le modèle à 6 paramètres ne peut pas représenter la FDRB simulée par le modèle DART. Une réflectance du sol très importante (50%) associée à une réflectance et transmittance foliaire faible (canal rouge) ainsi qu'à un taux de recouvrement

de 45% créent une FDRB très particulière. Une maquette de type « 4 arbres » ayant les mêmes caractéristiques ne présente pas cette particularité (Figure 0.10). Ce phénomène est expliqué dans le paragraphe concernant la comparaison entre les 2 types de maquette. Si l'on veut utiliser des maquettes de type « arbre » une solution consiste à ne pas effectuer de simulation avec des taux de recouvrement trop faible. En effet en gardant le même jeu de paramètres et en augmentant le taux de recouvrement, par exemple à 75%, les résultats obtenus redeviennent classiques (Figure 0.18). Les FDRB pour des valeurs moyennes de taux de recouvrement seront alors obtenues par interpolation entre FDRB pour un taux de recouvrement nul et FDRB pour un taux de recouvrement important. La FDRB ainsi obtenue correspond à celle d'un milieu constitué de zones faiblement et fortement couvertes.

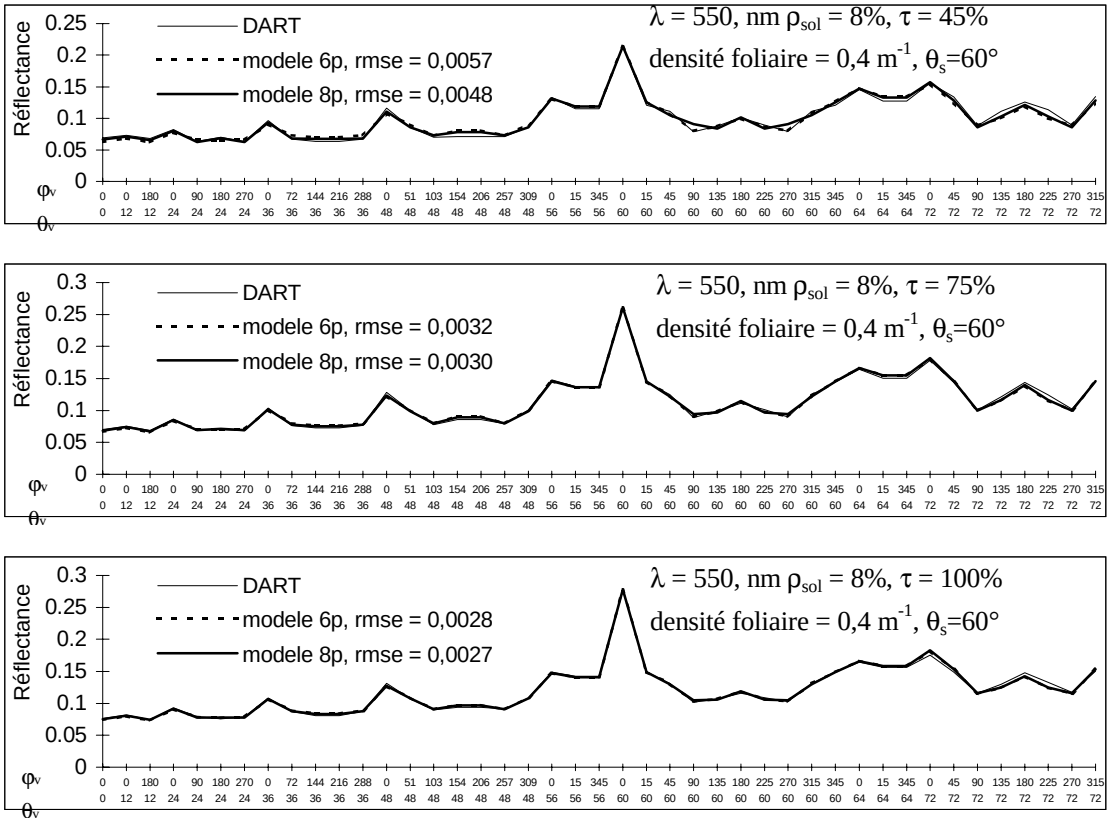


Figure 0.14 : Réflectances simulées par le modèle DART et obtenues par les modèles à 6 et 8 paramètres pour 3 valeurs du taux de recouvrement (45%, 75% et 100%).

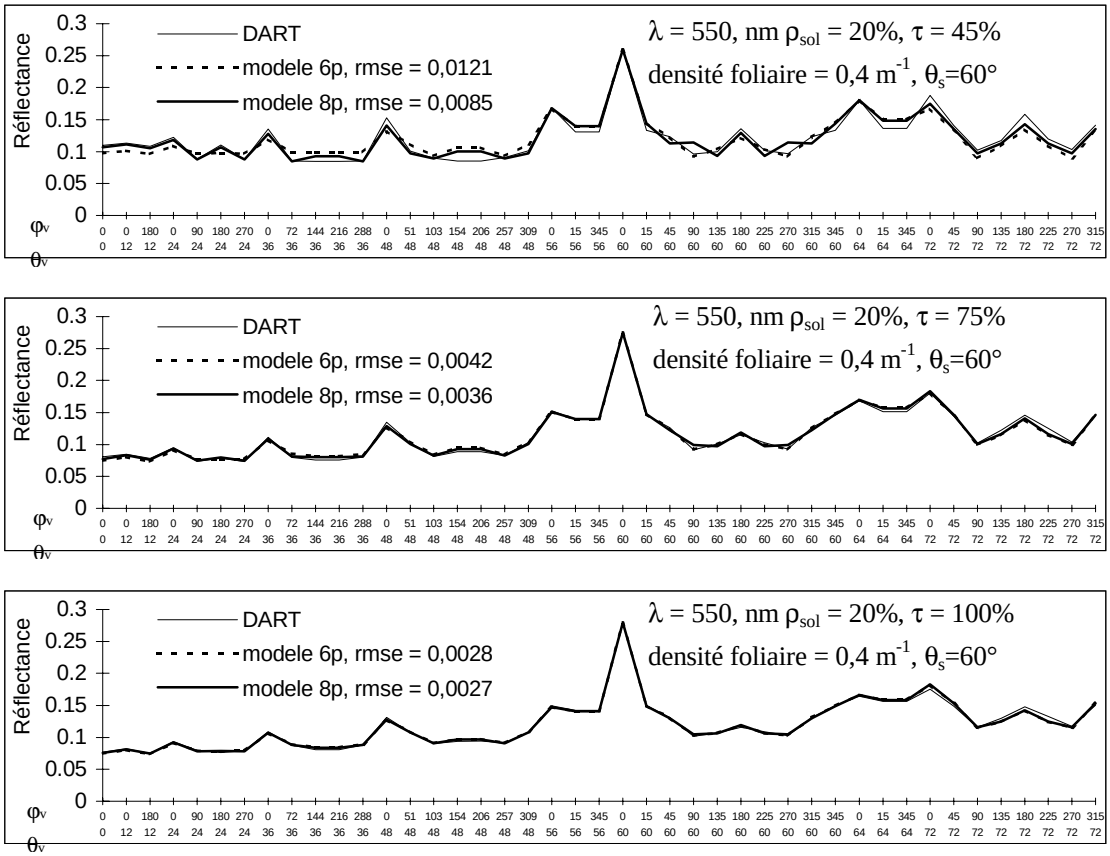


Figure 0.15 : Mêmes résultats que la Figure 0.14 pour une valeur de réflectance du sol plus importante (20% au lieu de 8%).

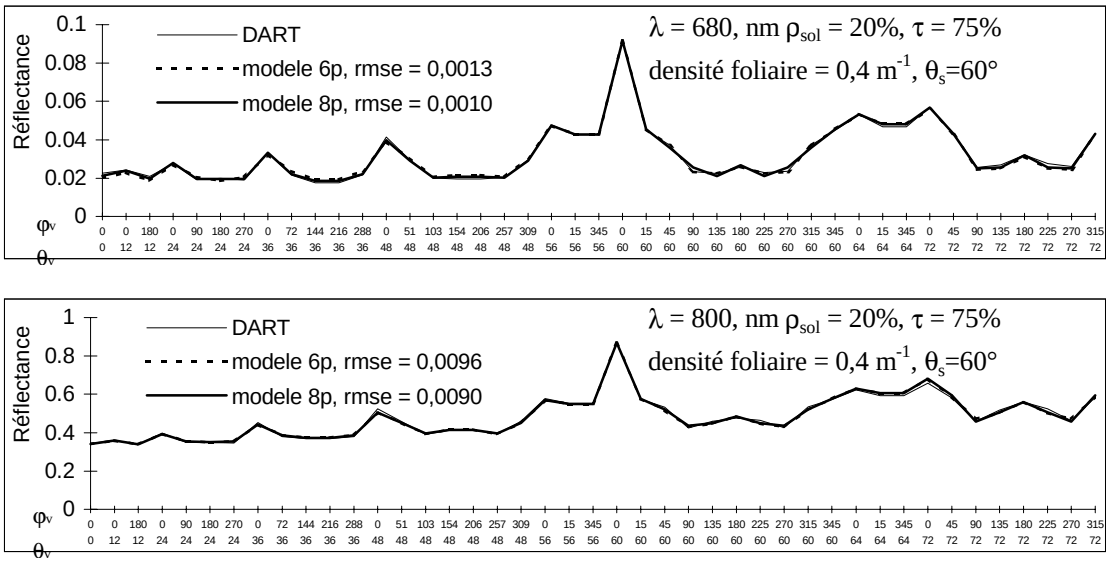


Figure 0.16 : Réflectances simulées par le modèle DART et obtenues par les modèles à 6 et 8 paramètres pour les bandes spectrales rouge (680 nm) et proche infrarouge (800 nm).

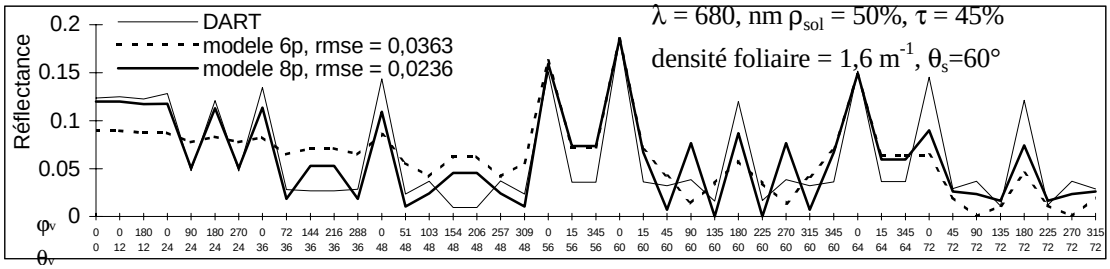


Figure 0.17 : Réflectances simulées par le modèle DART et obtenues par les modèles à 6 et 8 paramètres. Un taux de recouvrement de 45% et une réflectance du sol importante (50%) ne permettent pas au modèle à 6 paramètres de représenter correctement la FDRB simulée par DART. Le modèle à 8 paramètres permet dans ce cas une meilleure représentation.

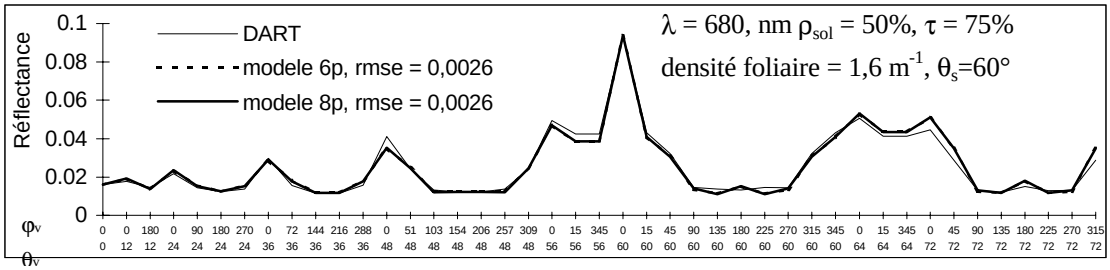


Figure 0.18 : Réflectances simulées par le modèle DART et obtenues par les modèles à 6 et 8 paramètres. L'augmentation du taux de recouvrement par rapport à la simulation de la Figure 0.17 permet de retrouver une forme classique de FDRB.

- ***Choix du modèle analytique.***

  Le choix peut être fait suivant deux critères : l'erreur de représentation d'une FDRB par le modèle analytique par rapport à celle simulée par le modèle DART et le temps de calcul. En ce qui concerne le dernier point, l'utilisation de 8 paramètres augmente le temps de calcul d'une réflectance d'un tiers par rapport au modèle à 6 paramètres. La durée de l'inversion augmente donc dans les mêmes proportions, ce qui est loin d'être négligeable. Pour ce qui est de la représentation, le modèle à 6 paramètres est mis en défaut pour des cas extrêmes peu fréquents et qui sont obtenus avec des maquettes de type « arbre ». Si le jeu de simulations ne comporte pas de tels cas, il est donc inutile d'utiliser 8 paramètres. Le choix d'un modèle analytique par rapport à l'autre s'effectuera en fonction du jeu de simulations choisi. Une procédure simple dans le programme permet de tester la validité des deux modèles analytiques.

- ***Les procédures d'interpolation.***

Une fois les 6 (8) coefficients c_i calculés pour chaque jeu de paramètres, il reste à effectuer l'interpolation pour obtenir les valeurs de ces coefficients pour un jeu quelconque de valeurs de paramètres. Cette interpolation est réalisée sur un espace de dimension n : le nombre de paramètres variant du modèle. Il est important de noter que la direction solaire peut faire partie de ces paramètres. On utilise des procédures d'interpolation à une variable, à l'aide du schéma classique résumé ci-dessous dans le cas où n=3.

Soit la fonction $f(p_1, p_2, p_3)$ à trois paramètres p_1, p_2, p_3 avec pour chacun n_1, n_2, n_3 valeurs discrètes du paramètre. Soit x_1, x_2, x_3 les valeurs pour lesquelles on veut obtenir une valeur interpolée de la fonction.

Première étape :

Estimation de $f(p_1, p_2, x_3)$ pour chaque valeur discrète de p_1 et p_2 par interpolation sur le paramètre p_3 en x_3. Soit $n_1 \times n_2$ valeurs.

Deuxième étape :

Estimation de $f(p_1, x_2, x_3)$ pour chaque valeur discrète de p_1 par interpolation sur le paramètre p_2, en x_2, en utilisant les valeurs du calcul précédent. Soit n_1 valeurs.

Troisième étape :

Estimation de $f(x_1, x_2, x_3)$ par interpolation sur le paramètre p_1, en x_1, en utilisant les valeurs du calcul précédent.

Trois procédures d'interpolation à une dimension ont été testées.

- ***Méthode polynomiale :***

Soit n valeurs discrètes $y_i = f(x_i)$ d'une fonction à une variable $f(x)$. Par les n points (x_i,y_i) passe un unique polynôme $P(x)$ de degré n-1. L'interpolation de la fonction en un point x quelconque consiste à rechercher la valeur du polynôme en ce point. Plusieurs

méthodes peuvent être utilisées dont la recherche des coefficients du polynôme *P(x)* défini par les formules de Lagrange : $P(x)=\sum_{i=1}^{n}\frac{\prod_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}(x-x_j)}{\prod_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}(x_i-x_j)}\times y_j$

Nous avons utilisé l'algorithme de Neville programmé dans *numerical recipies in C*. Celui-ci consiste à calculer la valeur en *x* de polynômes de degré croissant de 0 à *n*-1. Son principe est rapporté ci-dessous.

Soit P_i le polynôme de degré 0 passant par (x_i,y_i), $P_i = y_i \ \forall i \in [1,n]$.

Soit $P_{i(i+1)}$ le polynôme de degré 1 passant par (x_i,y_i) et (x_{i+1},y_{i+1}) $\forall i \in [1,n-1]$.

Soit $P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m)}$ le polynôme de degré m passant par (x_i,y_i), (x_{i+1},y_{i+1}), (x_{i+2},y_{i+2}), ... ,(x_{i+m},y_{i+m}) $\forall i \in [1,n-m]$.

Le polynôme recherché est $P(x) = P_{123\ldots n}$

Ces polynômes peuvent être calculés de manière récurrente :

$$P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m)} = \frac{(x-x_{i+m})P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2)\ldots(i+m)}}{x_i - x_{i+m}}$$

En effet $\forall j \in [i+1,\ldots,i+m-1]$ $P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m)}(x_j) = \frac{(x_j - x_{i+m})y_j + (x_i - x_j)y_j}{x_i - x_{i+m}} = y_j$ et

$P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m)}(x_i) = \frac{(x_i - x_{i+m})y_i}{x_i - x_{i+m}} = y_i$, $P_{i(i+1)(i+2)\ldots(i+m)}(x_{i+m}) = \frac{(x_i - x_{i+m})y_{i+m}}{x_i - x_{i+m}} = y_{i+m}$.

Une amélioration possible consiste à calculer les différences entre polynômes à chaque itération. On définit : $C_{m,i} = P_{i\ldots(i+m)} - P_{i\ldots(i+m-1)}$ et $D_{m,i} = P_{i\ldots(i+m)} - P_{(i+1)\ldots(i+m)}$. L'intérêt de cette approche est que les $C_{m,i}$ et $D_{m,i}$ sont très facilement calculés.

$$D_{m+1,i} = \frac{(x_{i+m+1} - x)(C_{m,i+1} - D_{m,i})}{x_{i+m+1} - x_i} \text{ et } C_{m+1,i} = \frac{(x_i - x)(C_{m,i+1} - D_{m,i})}{x_i - x_{i+m+1}}.$$

En effet :

$$D_{m+1,i} = P_{i\ldots(i+m+1)} - P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}$$

$$D_{m+1,i} = \frac{(x - x_{i+m+1})P_{i\ldots(i+m)} + (x_i - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_i - x_{i+m+1}} - P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}$$

$$D_{m+1,i} = \frac{(x - x_{i+m+1})P_{i\ldots(i+m)} - (x_i - x_{i+m+1})P_{(i+1)\ldots(i+m+1)} + (x_i - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_i - x_{i+m+1}}$$

$$D_{m+1,i} = \frac{(x_{i+m+1} - x)P_{i\ldots(i+m)} - (x_{i+m+1} - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_{i+m+1} - x_i}$$

$$D_{m+1,i} = \frac{(x_{i+m+1} - x)\left(P_{i\ldots(i+m)} - P_{(i+1)\ldots(i+m)} + P_{(i+1)\ldots(i+m)} - P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}\right)}{x_{i+m+1} - x_i}$$

$$D_{m+1,i} = \frac{(x_{i+m+1} - x)(C_{m,i+1} - D_{m,i})}{x_{i+m+1} - x_i}$$

De même :

$$C_{m+1,i} = P_{i\ldots(i+m+1)} - P_{i\ldots(i+m)}$$

$$C_{m+1,i} = \frac{(x - x_{i+m+1})P_{i\ldots(i+m)} + (x_i - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_i - x_{i+m+1}} - P_{i+\ldots(i+m)}$$

$$C_{m+1,i} = \frac{(x - x_{i+m+1})P_{i\ldots(i+m)} - (x_i - x_{i+m+1})P_{i\ldots(i+m)} + (x_i - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_i - x_{i+m+1}}$$

$$C_{m+1,i} = \frac{(x_i - x)P_{i\ldots(i+m)} - (x_i - x)P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}}{x_{i+m+1} - x_i}$$

$$C_{m+1,i} = \frac{(x_i - x)\left(P_{i\ldots(i+m)} - P_{(i+1)\ldots(i+m)} + P_{(i+1)\ldots(i+m)} - P_{(i+1)\ldots(i+m+1)}\right)}{x_{i+m+1} - x_i}$$

$$C_{m+1,i} = \frac{(x_i - x)(C_{m,i+1} - D_{m,i})}{x_i - x_{i+m+1}}$$

La valeur $P(u)$ de $P(x)$ en u est calculée de la manière suivante :

Les $C_{0,i}(u)$ et $D_{0,i}(u)$ sont initialisés en y_i, $P(u)$ est initialisé avec la valeur $P_i=P(x_i)$ du x_i le plus proche de u. L'algorithme est ensuite constitué d'une boucle pour k=1 à n-1. A chaque itération les valeurs de $C_{k,i}(u)$ et $D_{k,i}(u)$ sont calculées avec les formules ci-dessus en fonction de $C_{k-1,i+1}(u)$ et $D_{k-1,i}(u)$ et la valeur de $P(u)$ est incrémentée soit de $D_{k,i}(u)$ sur un trajet montant, soit de $C_{k,i}(u)$ sur un trajet descendant (Figure 0.19).

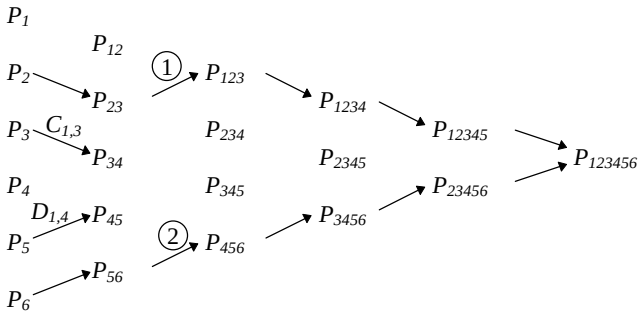


Figure 0.19 : Interpolation polynomiale : algorithme de Neville. Les trajets 1 et 2 représentent deux exemples de chemin de calcul de la valeur du polynome P_{123456}.

- ***Fonction spline cubique :***

On considère toujours *n* valeurs discrètes $y_i = f(x_i)$ d'une fonction à une variable $f(x)$. On peut interpoler la fonction *f* par une fonction de type spline cubique, passant par les *n* points (x_i,y_i). Cette fonction admet les propriétés suivantes : les dérivées premières et secondes sont continues. On peut définir une fonction spline cubique sur l'intervalle $[x_i, x_{i+1}]$ à l'aide d'un polynôme du troisième degré *P(x)* de la manière suivante :

$$P(x_i) = y_i,\ P(x_{i+1}) = y_{i+1},\ P''(x_i) = y_i'',\ P''(x_{i+1}) = y_{i+1}''$$

y_i'' et y_{i+1}'' sont les valeurs de dérivées secondes du polynôme. *P(x)* peut donc s'écrire :

$$P(x) = A(x) \times y_i + B(x) \times y_{i+1} + C(x) \times y_i'' + D(x) \times y_{i+1}''$$

avec *A(x)*, *B(x)*, *C(x)* et *D(x)* des polynômes de degré au plus 3.

A(x) est défini par $A(x_i) = 1,\ A(x_{i+1}) = 0,\ A''(x_i) = 0,\ A''(x_{i+1}) = 0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $A(x) = \dfrac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i}$

B(x) est défini par $B(x_i) = 0,\ B(x_{i+1}) = 1,\ B''(x_i) = 0,\ B''(x_{i+1}) = 0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $B(x) = \dfrac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}$

C(x) est défini par $C(x_i) = 0,\ C(x_{i+1}) = 0,\ C''(x_i) = 1,\ C''(x_{i+1}) = 0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $C(x) = \dfrac{1}{6} \times \left(A^3(x) - A(x)\right) \times (x_{i+1} - x_i)^2$.

D(x) est défini par $D(x_i) = 0,\ D(x_{i+1}) = 0,\ D''(x_i) = 0,\ D''(x_{i+1}) = 1$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $D(x) = \dfrac{1}{6} \times \left(B^3(x) - B(x)\right) \times (x_{i+1} - x_i)^2$.

Dans ces conditions, la dérivée première de *P(x)* peut s'écrire :

$$\begin{aligned} P'(x) = {} & \frac{-1}{x_{i+1} - x_i} \times y_i + \\ & \frac{1}{x_{i+1} - x_i} \times y_{i+1} + \\ & \frac{1}{6} \times \frac{-1}{x_{i+1} - x_i} \times \left(3 \times A^2(x) - 1\right) \times (x_{i+1} - x_i)^2 \times y_i'' + \\ & \frac{1}{6} \times \frac{1}{x_{i+1} - x_i} \times \left(3 \times B^2(x) - 1\right) \times (x_{i+1} - x_i)^2 \times y_{i+1}'' \end{aligned}$$

$$P'(x)=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}+\frac{-1}{6}\times\left(3\times A^2(x)-1\right)\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_i''+\frac{1}{6}\times\left(3\times B^2(x)-1\right)\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_{i+1}''$$

$$P'(x_i)=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}+\frac{-1}{6}\times(3-1)\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_i''+\frac{1}{6}\times(-1)\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_{i+1}''$$

$$P'(x_i)=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}+\frac{-2}{6}\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_i''+\frac{-1}{6}\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_{i+1}''$$

La continuité de la dérivée première au point x_i permet de calculer $P'(x_i)$ à partir de la définition de *P(x)* sur l'intervalle $[x_{i-1},x_i]$:

$$P'(x_i)=\frac{y_i-y_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}+\frac{1}{6}\times\left(x_i-x_{i-1}\right)\times y_{i-1}''+\frac{2}{6}\times\left(x_i-x_{i-1}\right)\times y_i''$$

On obtient l'équation :

$$\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}+\frac{-1}{6}\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times\left(2\times y_i''+y_{i+1}''\right)=\frac{y_i-y_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}+\frac{1}{6}\times\left(x_i-x_{i-1}\right)\times\left(2\times y_i''+y_{i-1}''\right)$$

soit

$$\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}-\frac{y_i-y_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}=\frac{1}{6}\times\left(x_i-x_{i-1}\right)\times y_{i-1}''+\frac{1}{3}\times\left(x_{i+1}-x_{i-1}\right)\times y_i''+\frac{1}{6}\times\left(x_{i+1}-x_i\right)\times y_{i+1}''$$

La série y_i'' est complètement définie par cette relation et deux valeurs de y_i''. Dans la pratique on fixe les valeurs de y_1'' et de y_n''. Lorsque ces valeurs valent zéro, la fonction spline cubique est appelée spline cubique libre. C'est cette dernière que nous avons employée. Le code utilisé est celui de *numerical recipies in C* .

- ***Méthode à dérivée première imposée et continue :***

  On considère toujours *n* valeurs discrètes $y_i=f(x_i)$ d'une fonction à une variable $f(x)$. On choisit de faire passer par les *n* points (x_i,y_i) une fonction continue à dérivée première continue. On imposera de plus la dérivée première. Le but est d'obtenir une méthode d'interpolation plus rapide que la méthode de type spline cubique. On peut définir cette fonction sur l'intervalle $[x_i,x_{i+1}]$ à l'aide d'un polynôme du troisième degré *P(x)* de la manière suivante :

$$P(x_i)=y_i,\ P(x_{i+1})=y_{i+1},\ P'(x_i)=y_i',\ P'(x_{i+1})=y_{i+1}'$$

  P(x) peut s'écrire : $P(x)=A(x)\times y_i+B(x)\times y_{i+1}+C(x)\times y_i'+D(x)\times y_{i+1}'$

  avec *A(x)*, *B(x)*, *C(x)* et *D(x)* des polynômes de degré au plus 3.

A(x) est défini par $A(x_i)=1$, $A(x_{i+1})=0$, $A'(x_i)=0$, $A'(x_{i+1})=0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $A(x)=\frac{1}{2}-\frac{(2\times x-x_i-x_{i+1})\times\left((x-x_i)^2+(x-x_{i+1})^2-2\times(x_i-x_{i+1})^2\right)}{2\times(x_i-x_{i+1})^3}$

$$A'(x)=\frac{-2\times\left((x-x_i)^2+(x-x_{i+1})^2-2\times(x_i-x_{i+1})^2\right)-2\times(2\times x-x_i-x_{i+1})^2}{2\times(x_i-x_{i+1})^3}$$

B(x) est défini par $B(x_i)=0$, $B(x_{i+1})=1$, $B'(x_i)=0$, $B'(x_{i+1})=0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $B(x)=\frac{1}{2}+\frac{(2\times x-x_i-x_{i+1})\times\left((x-x_i)^2+(x-x_{i+1})^2-2\times(x_i-x_{i+1})^2\right)}{2\times(x_i-x_{i+1})^3}$

$$B'(x)=\frac{2\times\left((x-x_i)^2+(x-x_{i+1})^2-2\times(x_i-x_{i+1})^2\right)+2\times(2\times x-x_i-x_{i+1})^2}{2\times(x_i-x_{i+1})^3}$$

C(x) est défini par $C(x_i)=0$, $C(x_{i+1})=0$, $C'(x_i)=1$, $C'(x_{i+1})=0$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $C(x)=\frac{(x-x_i)\times(x-x_{i+1})^2}{(x_i-x_{i+1})^2}$ $C'(x)=\frac{(x-x_{i+1})^2+2\times(x-x_{i+1})\times(x-x_i)}{(x_i-x_{i+1})^2}$

D(x) est défini par $D(x_i)=0$, $D(x_{i+1})=0$, $D'(x_i)=0$, $D'(x_{i+1})=1$. Un polynôme vérifiant ces équations est : $D(x)=\frac{(x_{i+1}-x)\times(x-x_i)^2}{(x_i-x_{i+1})^2}$ $D'(x)=\frac{-(x-x_i)^2-2\times(x-x_{i+1})\times(x-x_i)}{(x_i-x_{i+1})^2}$

Ici, la dérivée première imposée au point *i* (*i≠1 et i≠n*) est calculée par les relations :

$y_i'=\frac{y_{i+1}-y_{i-1}}{x_{i+1}-x_{i-1}}$ avec $y_1'=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$ et $y_n'=\frac{y_n-y_{n-1}}{x_n-x_{n-1}}$

- ***Comparaison des trois méthodes d'interpolation.***

  La comparaison est effectuée dans un premier temps sur l'efficacité des méthodes. Les simulations utilisées sont celles réalisées pour effectuer le test du modèle de FDRB à 6 paramètres. Elles ont été effectuées pour 3 valeurs d'angle zénithal solaire : 20°, 40° et 60°, 5 valeurs de réflectance du sol : 0%, 2%, 32%, 50% et 80%, 5 valeurs de densité foliaire u_f: 0,1 , 0,2 , 0,4 , 0,8 et 1,6 et 4 valeurs du taux de recouvrement : 0%, 45%, 75% et 100%. Trois canaux spectraux ont également été simulés : vert, rouge et proche infrarouge. Seuls les résultats du canal vert sont présentés ici. La Figure 0.20 indique une très bonne concordance entre les résultats de l'interpolation de type spline et celle de type dérivée continue imposée. Par contre l'interpolation de type polynomiale a tendance à créer des

oscillations lorsque le nombre de valeurs du paramètre considéré est important et que l'évolution de la réflectance entre deux valeurs consécutives de ce paramètre est faible. Ce phénomène s'observe très bien sur le graphique donnant l'évolution en fonction de la densité foliaire (Figure 0.20 et Figure 0.21). Son influence est visible sur la Figure 0.21 où les paramètres fixes prennent des valeurs éloignées des valeurs de simulation. L'interpolation polynomiale donne alors des résultats aberrants. Elle est donc à proscrire.

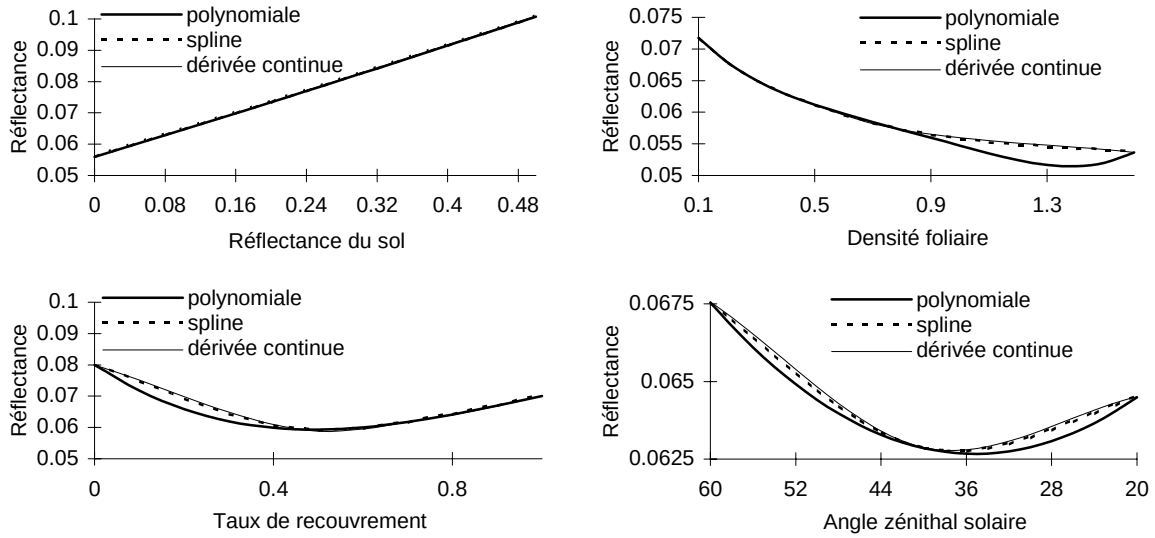


Figure 0.20 : Comparaison des 3 méthodes d'interpolation. Les valeurs des paramètres quand ils sont fixes sont ρ_{sol}=0,08, densité foliaire=0,4 m^{-1}, τ=0,75, θ_s=20°, θ_v=20°, $\Delta\phi$=180°.

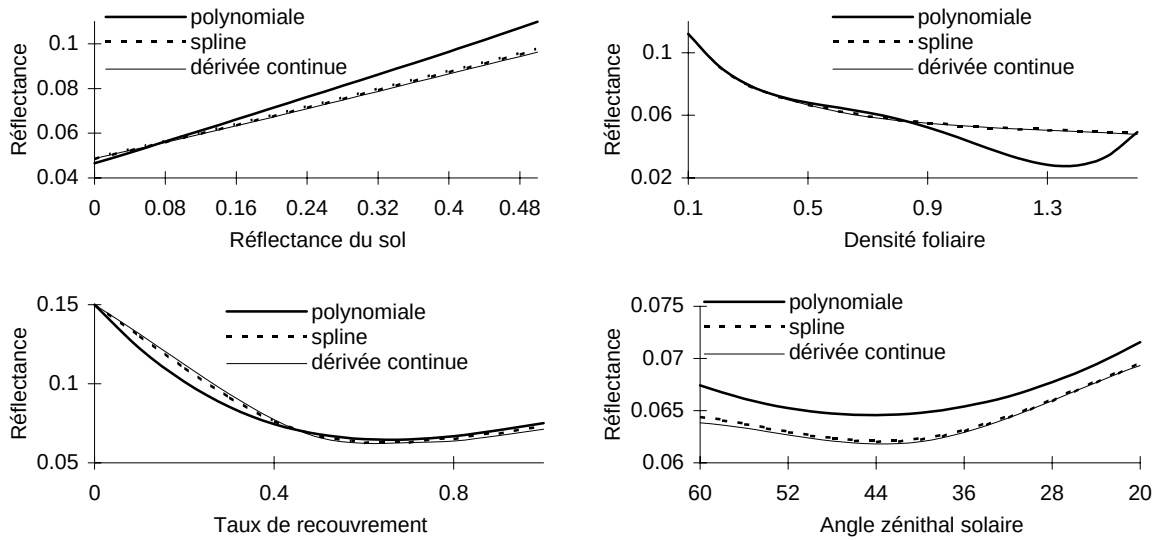


Figure 0.21 : Comparaison entre les méthodes d'interpolation. Les valeurs des paramètres lorsqu'ils sont fixes sont ρ_{sol}=0,15, densité foliaire=0,6 m^{-1}, τ=0,6, θ_s=30°, θ_v=20°, $\Delta\phi$=180°.

La Figure 0.22 présente les réflectances calculées avec la combinaison de l'interpolation et du modèle à 6 paramètres. Deux cas sont considérés : angle zénithal d'observation de 0° à 50° et angle zénithal solaire de 20° à 60°.

En conclusion, la méthode polynomiale a été rejetée. La méthode à dérivée continue imposée fournit des résultats comparables à ceux de la méthode de type spline. De plus elle est deux fois plus rapide. Cette méthode a donc été retenue pour effectuer les différentes inversions.

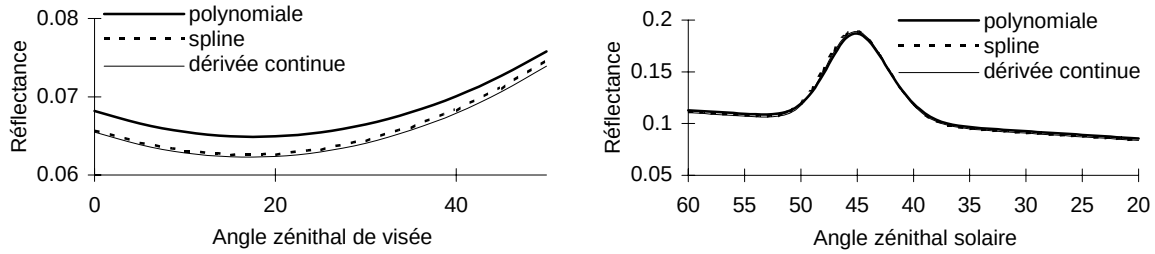


Figure 0.22 : Comparaison entre les méthodes d'interpolation. Variation en fonction de l'angle zénithal de visée et de l'angle zénithal solaire, même paramètres que pour la Figure 0.21.

Procédure d'inversion.

Avant d'effectuer l'inversion, une procédure effectue le calcul des coefficients c_i de la fonction analytique associée à chaque simulation. Ces coefficients sont ensuite enregistrés dans un fichier binaire, en vue d'une utilisation ultérieure. De la même façon, un fichier de réflectance au nadir est créé dans le but d'être utilisé pour l'inversion de données acquises au nadir.

- ***Choix des paramètres libres.***

  La première étape consiste à choisir les paramètres libres. Nous nous sommes volontairement limités pour le moment aux paramètres suivants : réflectance du sol, LAI du sous-bois, LAI du houppier, taux de recouvrement.

- ***Un modèle de réflectance du sol.***

  Laisser la réflectance du sol libre pour chaque canal augmente le nombre de paramètres libres et rend l'inversion impossible lorsque le nombre de données en entrée est insuffisant. Nous avons donc essayé de paramètrer la réflectance du sol à l'aide d'un modèle à *n*

paramètres $R_s(\lambda_j) = \sum_{i=1}^{n} p_i \times R_{si}(\lambda_j)$, *n* étant compris entre 1 et 3. Ce modèle de sol permet de représenter différents sols. Il permet entre autre de faire intervenir des facteurs tels que l'humidité, qui a tendance à agir de façon linéaire sur tout le spectre, d'où la pertinence d'un modèle linéaire. Les valeurs $R_{si}(\lambda_j)$ sont données par l'opérateur, les λ_j étant les différents canaux utilisés pour l'inversion. Rechercher la réflectance du sol consiste donc à retrouver les *n* valeurs des paramètres p_i.

- ***Saisie des paramètres d'inversion.***

  L'opérateur doit fournir les informations suivantes pour que l'inversion puisse être effectuée de manière automatique par le programme. La saisie peut être effectuée par lecture de fichier ou en interactif :

  - *du type de donnée (FDRB, image SPOT, Landsat).*
  - *du type de modèle de FDRB (6 ou 8 paramètres).*
  - *du nom des fichiers de données.*
  - *du nom du fichier masque (éventuellement).*
  - *du type d'erreur à minimiser (relative ou absolue).*
  - *du type d'interpolation.*
  - *des paramètres libres et fixes avec leurs valeurs dans ce cas.*
  - *du type de modèle de sol (nombre de paramètres).*
  - *du nom du fichier résultat.*

Le programme procède alors à l'inversion des données. Il lit pour chaque pixel, lorsqu'il s'agit d'image, le nombre de valeurs de réflectance disponibles et pour chaque valeur les caractéristiques d'observation : angles et canal. La présence d'un fichier masque permet de traiter uniquement les zones intéressantes d'une image. L'inversion consiste alors à minimiser la fonction coût, représentant l'erreur absolue : $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval} \left(\rho_i - R(\theta_{si}, \theta_{vi}, \Delta\varphi_{svi}, \lambda_i, \mathbf{p})\right)^2$. Avec *nbval* le nombre de valeurs de réflectance disponibles, ρ_i la i^{éme} valeur de réflectance, θ_{si}, θ_{vi}, $\Delta\varphi_{svi}$, les angles d'éclairement et de visée correspondants, λ_i le canal correspondant et **p** le vecteur paramètre sur lequel on réalise l'inversion. Le programme offre aussi la possibilité de minimiser la fonction coût

représentant l'erreur relative : $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval}\left(\frac{\rho_i - R(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p})}{\rho_i}\right)^2$ ce qui a pour effet de ne pas favoriser le canal proche infrarouge devant les autres canaux compte tenu du fait que la réflectance dans ce canal est en moyenne très supérieure à celle dans les canaux vert et rouge. Une option supplémentaire du programme permet d'utiliser la fonction coût $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval}\left(\frac{\rho_i - R(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p})}{k_i}\right)^2$ avec $k_i=\rho_i$ *si* $\rho_i \geq \rho_{min}$ sinon $k_i=\rho_{min}$, ρ_{min} étant saisie par l'utilisateur. Ce dernier cas permet de ne pas trop favoriser les réflectances voisines de zéro.

La méthode de minimisation utilisée est celle du simplexe décrite en début de ce chapitre. Le code a été extrait de *numerical recipies in C*. La recherche du minimum s'effectue à partir de plusieurs simplexes initiaux, jusqu'à atteindre une valeur d'erreur minimale choisie par l'opérateur ou bien un nombre maximal de simplexes initiaux (également choisi). Compte tenu du temps de calcul relativement élevé, lorsque l'on inverse des images, le seuil d'arrêt de la procédure du simplexe a été fixé à une valeur plus grande que celle recommandée habituellement (racine carrée de la précision de la machine). Cette valeur influence la précision sur la localisation du minimum. Dans le cas d'une valeur trop importante la procédure peut s'arrêter sur un point ne correspondant pas à un minimum. Le choix du seuil d'arrêt de la procédure comme celui du nombre maximum de simplexes initiaux est donc un compromis entre la précision du résultat et la rapidité du calcul.

- ***Contraintes sur les paramètres libres.***

  Compte tenu des procédures d'interpolation utilisées, la valeur de chaque paramètre libre doit être comprise entre les valeurs extrêmes utilisées pour les simulations. De plus, les valeurs des paramètres du modèle de réflectance de sol doivent être compris entre 0 et 1. Pour cela, la fonction coût est calculée de la façon suivante, dans le cas d'une erreur absolue :

  $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval}\left(\rho_i - R(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p})\right)^2$ si $\forall j \in [1,m]$ $p_j \geq p_{jmin}$ et $p_j \leq p_{jmax}$

  si $p_j \geq p_{jmax}$, $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval}\left(\rho_i - R\left(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p}_{(p_j=p_{j\max})}\right)\right)^2 + p_j - p_{j\max}$

  si $p_j \leq p_{jmin}$, $\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{nbval}\left(\rho_i - R\left(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p}_{(p_j=p_{j\min})}\right)\right)^2 + p_{j\min} - p_j$

- ***Test de robustesse.***

  Un test de robustesse est difficile à réaliser dans le cas général, puisqu'il va dépendre des simulations réalisées, du nombre de canaux, des directions de visée et d'éclairement, et des paramètres libres choisis. Il est cependant intéressant de montrer un exemple. En effet rien ne nous permet d'affirmer qu'en utilisant des réflectances issues d'une simulation on obtienne par inversion ne serait ce que quelques paramètres de cette simulation, et ceci même sans ajouter de bruit sur les valeurs de réflectance en entrée. Ce test est donc essentiel avant de réaliser l'inversion à partir de données réelles. Il peut permettre, entre autre, de régler des paramètres tels que le nombre maximum de simplexes initiaux, ou bien le seuil d'arrêt de la procédure de recherche de minimum. Il peut également servir à adapter le modèle de sol choisi, ou à choisir les paramètres libres, et ceci avec un critère objectif : la robustesse.

  Pour faciliter la mise en oeuvre de ce test, une procédure a été intégrée dans le programme. Celle-ci permet à partir d'un fichier texte semblable à celui utilisé pour l'inversion, de générer un jeu de simulations en choisissant le nombre de valeurs désirées pour les paramètres libres et en y ajoutant le bruit voulu (bruit blanc additif ou proportionnel). L'inversion du jeu de simulations est réalisée simultanément à sa création. Un fichier résultat est alors créé. Il contient les valeurs réelles des paramètres libres et celles obtenues par inversion, ainsi que le coefficient de corrélation, le RMSE, et les coefficients (a et b) de la droite de régression pour chaque paramètre libre.

  Un exemple de test de robustesse est présenté ci dessous. Il s'agit de celui effectué pour l'inversion de données SPOT sur la forêt de Fontainebleau. Nous avons utilisé deux paramètres libres : le taux de recouvrement ligneux τ et la densité foliaire u_f. La réflectance du sol a été fixée aux valeurs suivantes : ρ_s=5% pour le vert, ρ_s=7% pour le rouge et ρ_s=8% pour le proche infrarouge. Le nombre de simplexes initiaux a été fixé à cinq. La fonction coût utilisée correspond à une erreur relative avec un seuil inférieur sur la réflectance ρ_{min}=10%. Dix valeurs par paramètre ont été utilisées, le taux de recouvrement variant entre 0 et 1, la densité foliaire entre 0,2 et 0,8. Cent valeurs aléatoires de bruit blanc ont été systématiquement appliquées aux réflectances spectrales simulées, pour chaque couple (τ,u_f).

Les résultats du Tableau 0.1 montrent clairement qu'un paramètre comme le taux de recouvrement est facile à retrouver, du moins dans le cas d'un sol ayant une réponse spectrale non chlorophyllienne. Au contraire la densité foliaire est particulièrement difficile à retrouver. Pour les faibles valeurs de taux de recouvrement, les résultats sont en effet très mauvais. Cependant, dans ces conditions, le LAI est proportionnel au produit de la densité foliaire par le taux de recouvrement. L'erreur absolue sur ce paramètre ne sera donc pas importante. Les résultats redeviennent corrects pour des taux élevés. Dans l'ensemble, si on considère qu'un bruit proportionnel de 5% est raisonnable on peut espérer retrouver le LAI et le taux de recouvrement par inversion, à condition que la modélisation utilisée corresponde bien à la réalité. Dans la pratique compte tenu des erreurs d'étalonnage et de corrections atmosphériques, le bruit sera certainement supérieur à 5%, à moins de posséder des cibles de référence au sol. De plus, la modélisation n'a pas pu être validée. En conclusion une étude de sensibilité est donc intéressante mais un test de validation utilisant des valeurs mesurées de LAI s'impose évidemment. Différents tests de ce type sont présentés dans cette thèse.

		bruit				
		additif		proportionnel		
		0	0,01	0,05	5%	10%
LAI [0-9,3]	RMSE	0,087	0,770	1,031	0,455	0,723
	r^2	0,998	0,845	0,738	0,945	0,869
	a	1,000	0,927	0,888	0,983	0,975
	b	-0,007	0,184	0,238	0,023	0,052
u_f [0,2-0,8]	RMSE	0,066	0,267	0,301	0,162	0,210
	r^2	0,8761	0,049	0,004	0,400	0,196
	a	1,006	0,317	0,101	0,737	0,565
	b	0,008	0,354	0,466	0,133	0,216
τ [0-100%]	RMSE	0,016	0,122	0,167	0,052	0,080
	r^2	0,997	0,842	0,737	0,968	0,926
	a	1,007	0,967	0,961	0,986	0,97
	b	-0,001	0,038	0,044	0,013	0,026

Tableau 0.1 : Résultat d'un test de robustesse de l'inversion.

- ***Sortie des résultats.***

  Deux types de résultats sont obtenus, suivant la nature des données utilisées pour l'inversion :

  Pour l'inversion d'images, l'ensemble des résultat est écrit dans un fichier au format spécial. La valeur de chaque paramètre libre ainsi que le RMSE :

RMSE = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nbval}\left(\rho_i - R\left(\theta_{si},\theta_{vi},\Delta\varphi_{svi},\lambda_i,\mathbf{p}\right)\right)^2}{nbval}}$ sont enregistrés en binaire codé sur un octet (2 pour le RMSE). Un programme réalisé avec MATLAB (Figure 0.23) permet la lecture et l'affichage des images paramètre par paramètre. Ce programme permet également de réaliser quelques traitements des images résultats avant l'exportation au format ILWIS ou TIFF. On peut en particulier réaliser un seuillage sur le RMSE final permettant de supprimer les pixels ne donnant pas de bon résultats à l'inversion. Ceci a été utilisé par exemple pour éliminer les zones de sol nu ou de culture autour de la forêt de Fontainebleau.

Lors de l'inversion de FDRB, le programme écrit dans un fichier les valeurs des paramètres libres, le RMSE ainsi que les valeurs de la FDRB initiale et de la FDRB associée aux paramètres calculés par inversion. Ceci permet de vérifier l'efficacité de l'inversion. Un autre programme réalisé avec MATLAB permet également de visualiser ces résultats (Figure 0.24).

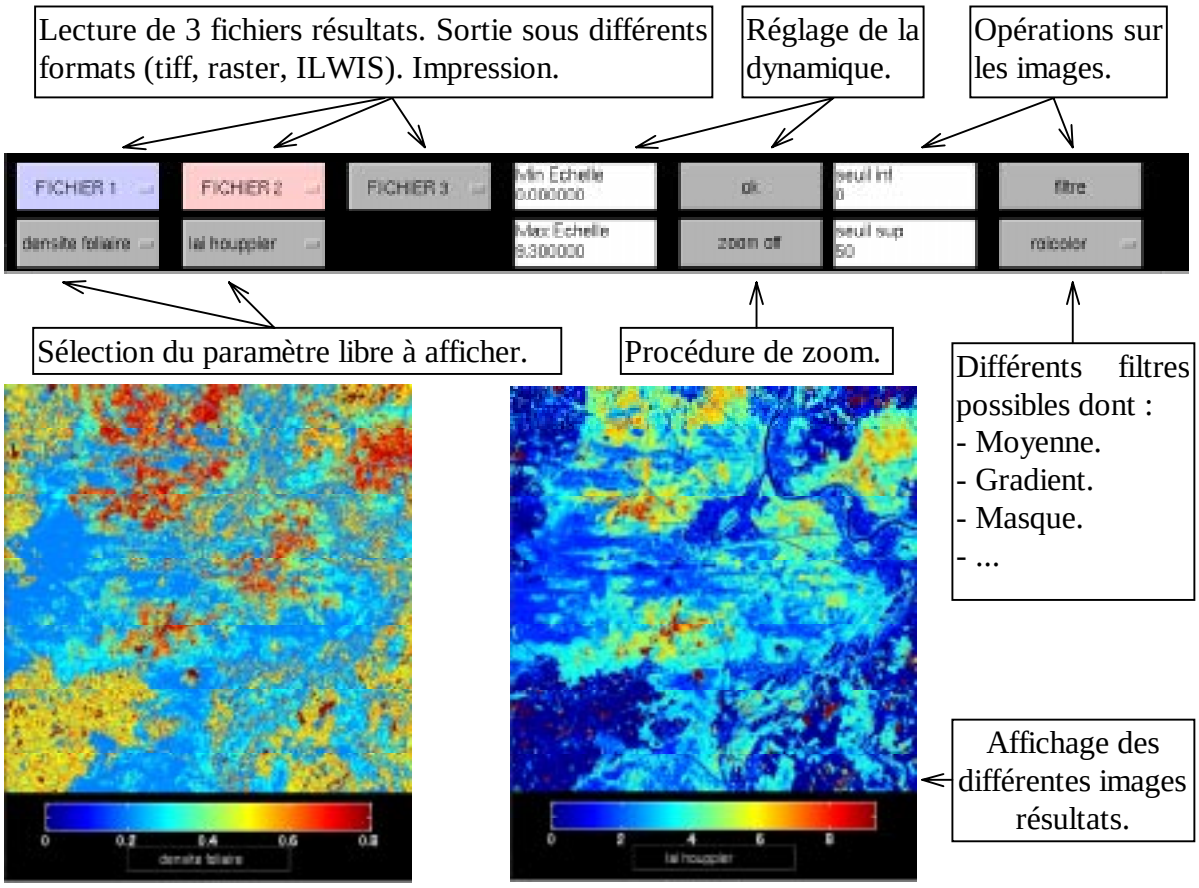


Figure 0.23 : Logiciel de visualisation des résultats d'inversion d'images.

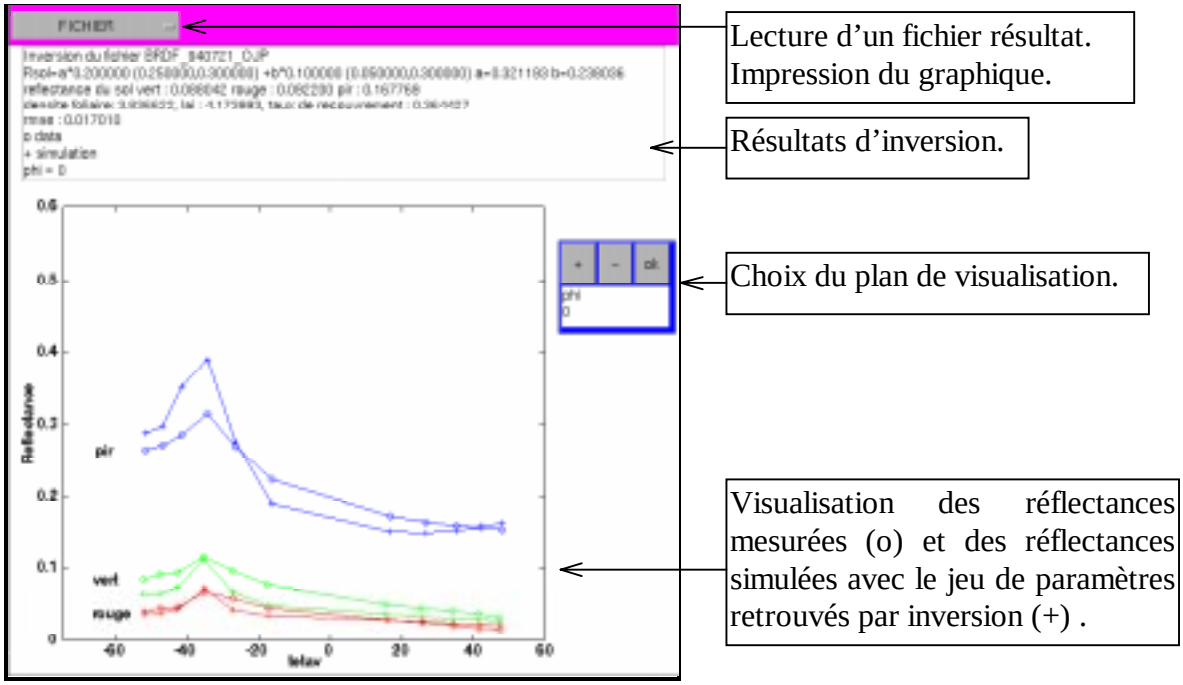


Figure 0.24 : Logiciel de visualisation des résultats d'inversion de FDRB.

II UNE MÉTHODE D'INVERSION DU MODÈLE DART.....15
II.1 Généralités sur l'inversion et les différentes méthodes. 15
II.2 Inversion d'un modèle de transfert radiatif. 17
II.3 Inversion du modèle DART. 18
II.4 Mise au point d'une méthode d'inversion. 20
II.4.1 Les paramètres d'entrée du programme. 21
II.4.2 Mise en place des différentes simulations. 32
II.4.3 Traitement des simulations. 35
II.4.4 Procédure d'inversion. 49

III EVALUATION DE LA MORTALITE LIGNEUSE AU BURKINA FASO A PARTIR D'IMAGES LANDSAT MSS

Introduction.

Ce travail a été réalisé pour résoudre un problème concret posé par les écologistes du Laboratoire d'Écologie Terrestre (LET) de l'Université Paul Sabatier (Toulouse). Une série de dix images Landsat MSS, de 1972 à 1990, avait été acquise sur un site du Burkina Faso dans le but de mettre en évidence la dégradation des écosystèmes arborés et arbustifs tropicaux secs (Goita *et al.*, 1993). Une première étude réalisée en utilisant l'indice de végétation NDVI n'avait pas apporté de réponse satisfaisante (Miquel, 1993). L'outil modélisation associé à l'inversion pouvait-il conduire à de meilleurs résultats ? Afin de répondre à cette question, une méthode d'inversion basée sur une modélisation simple de la réflectance du paysage a été développée. En effet, la mise au point de la méthode d'inversion décrite dans le chapitre II n'avait pas encore été réalisée. Malgré cela, les résultats ont été jugés très satisfaisants ; ils ont en effet permis une analyse plus précise du phénomène de mortalité des espèces ligneuses. La modélisation et l'inversion se sont donc avérées constituer des outils intéressants pour le traitement d'images satellitales à des fins de suivi écologique.

Ce travail a été conduit en collaboration avec le LET pour l'aspect thématique, et notamment pour les campagnes de terrain, le traitement visuel des photographies aériennes et l'interprétation écologique des résultats. Il a donnée lieu à une publication (Estève *et al.*, 1998) et à une communication sur la méthode de validation (Fontès *et al.*, 1997).

Les milieux tropicaux secs et leur surveillance par télédétection.

La dégradation des écosystèmes et l'érosion de la biodiversité dans la zone intertropicale se traduisent depuis plusieurs années par l'extension des surfaces de sol nu et par la mortalité des ligneux (Malingreau *et al.*, 1988 ; Serpantié *et al.*, 1992 ; Bille, 1992a). Les raisons

essentielles en sont la pression démographique, ainsi que les aléas climatiques. La compréhension et l'évaluation de ces phénomènes sont des enjeux écologiques et économiques importants. Malheureusement, le manque de données sur le terrain rend ce travail difficile. Les images satellitales peuvent apporter une solution. En effet, de nombreuses études sur ce milieu ont déjà montré le potentiel de la télédétection spatiale pour la surveillance de l'évolution de la couverture végétale (Justice *et al.,* 1985 ; Tucker *et al.,* 1986a ; Malingreau *et al.,* 1989 ; Bille, 1992b ; Foody *et al.,* 1996 ; Malingreau *et al.,* 1996). Des indices de végétation tels que le NDVI sont en général utilisés pour relier les images satellitales à la présence de végétation (Townshend *et al.,* 1986 ; Rondeaux *et al.,* 1996). Le NDVI peut en particulier être utilisé à partir de données NOAA pour la surveillance des milieux herbacés homogènes (Tucker *et al.,* 1986b), ou bien à partir de données Landsat TM ou MSS, ou SPOT afin d'estimer par exemple les volumes de bois sur pied (Defourny, 1992). Cependant, les avis concernant l'efficacité de ces indices sont partagés (Hiernaux *et al.,* 1986). Une nouvelle voie a été ouverte avec l'apparition des modèles de simulation du transfert radiatif dans la végétation, dont l'inversion permet, à partir des images satellitales, d'accéder directement aux paramètres biophysiques recherchés. Cette étude a permis, sur un site test particulier, d'évaluer une méthode basée sur la modélisation et l'inversion, et de la comparer avec celle, plus classique, basée sur l'utilisation du NDVI.

Le site d'étude.

La région de Tougouri Dakiri Boulsa (Figure 0.1) se situe dans le nord-est du Burkina Faso, au centre de la région soudano-sahélienne. Elle a subi deux périodes de sécheresse dans le milieu des années soixante-dix et quatre-vingt. Ceci s'est traduit par une mortalité ligneuse importante (Figure 0.2). Cette région a été couverte par une série de 10 images Landsat MSS acquises entre 1972 et 1990 (Tableau 0.1), à des dates correspondant au début de la saison sèche. La disponibilité d'images satellitales combinée à la forte mortalité ligneuse locale expliquent le choix de cette région comme site d'étude. La dégradation de l'environnement se remarque par la présence de surfaces étendues de sol nu et surtout d'arbustes morts. Le nombre des ligneux encore vivants, mesuré par l'intermédiaire du taux de recouvrement, peut donc être utilisé comme indicateur de l'état écologique du milieu. C'est ce paramètre que nous allons essayer de calculer à partir des images Landsat MSS.

Les images Landsat MSS utilisées ont été acquises dans le cadre d'un projet AUPELF/UREF (Royer *et al.,* 1994). Le capteur MSS embarqué sur le satellite Landsat comporte quatre

canaux appelés MSS4 (500-600 nm), MSS5 (600-700 nm), MSS6 (700-800 nm) et MSS7 (800-1100 nm). La résolution du pixel au sol est approximativement de 76 m. Dans ce projet, seules les images MSS4, MSS5, et MSS7 correspondant au vert, rouge et proche infrarouge ont été utilisées. Elles ont tout d'abord été corrigées des effets atmosphériques, puis rééchantillonnées à cinquante mètres de résolution afin d'obtenir dix images superposables et donc comparables pixel à pixel (Goita *et al.*, 1993).

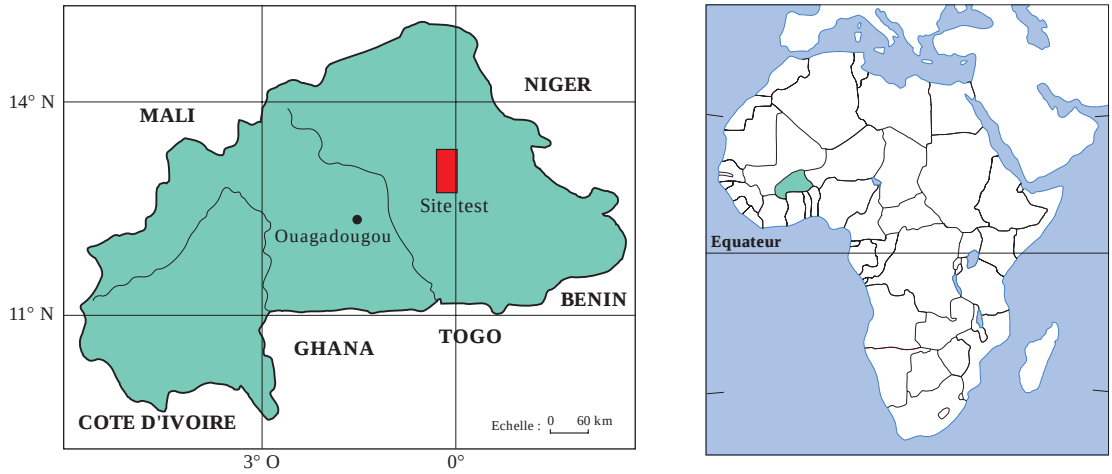


Figure 0.1 : Localisation du site d'étude.

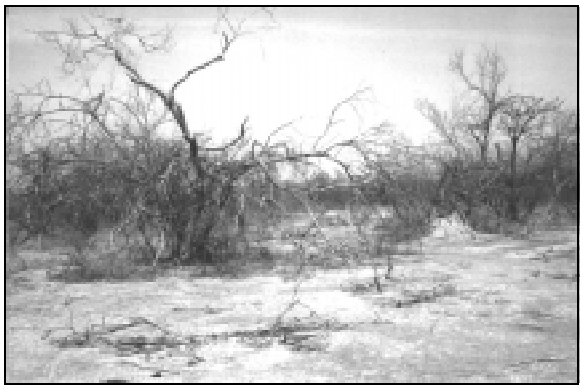


Figure 0.2 : Mortalité des ligneux au Burkina Faso (Photo Fontès, 1994).

Landsat	Capteur	Date	Orbite	Rang
1	MSS	12/11/72	209	51
2	MSS	06/11/75	209	51
2	MSS	26/11/78	209	51
3	MSS	30/11/79	209	51
3	MSS	14/10/81	209	51
5	MSS	05/11/84	194	51
5	MSS	21/11/84	194	51
5	MSS	08/11/85	194	51
5	MSS	16/11/88	194	51
5	MSS	21/10/90	194	51

Tableau 0.1 : Les 10 images Landsat MSS.

Les deux objectifs de l'étude.

Le premier objectif est essentiellement méthodologique. Il s'agit d'obtenir dix images de taux de recouvrement ligneux correspondant aux dix images Landsat MSS. Pour cela, la réflectance du paysage a été modélisée pour les trois canaux MSS4, MSS5 et MSS7, par une expression mathématique simple, faisant intervenir le taux de recouvrement. Le modèle DART a été utilisé pour établir cette expression, qui a ensuite été inversée pour obtenir le taux de recouvrement.

Le deuxième objectif consiste à quantifier et à localiser la mortalité ligneuse. Il a été atteint grâce à une procédure automatique, analysant les dix images de taux de recouvrement.

Un modèle simplifié de la réflectance du paysage et son inversion.

Les paysages caractéristiques du Sahel (Figure 0.3 et Figure 0.4) sont composés de sols nus recouverts d'arbres, de buissons et d'herbes, plus ou moins dispersés. Comme pour les modèles géométriques, nous avons considéré que la réflectance d'une unité de paysage était égale à la somme des réflectances apparentes de chaque élément (sol nu, herbe, et végétation ligneuse), pondérées par leur taux de recouvrement respectif. La réflectance apparente tient compte des effets non linéaires (phénomènes d'ombre, diffusions multiples), dus aux interactions entre les différents éléments du paysage. Nous avons effectué un test d'inversion sur une image pour quantifier l'influence de ces effets. Pour cela, nous avons inversé une expression prenant en compte les effets non linéaires et une expression ne les prenant pas en compte. La comparaison des valeurs de taux de recouvrement ainsi obtenues, indique que le fait de négliger ces effets peut conduire à une surestimation de l'ordre de 50%. Les hypothèses simplificatrices utilisées pour modéliser la réflectance des paysages du site d'étude sont indiquées dans les paragraphes suivants.

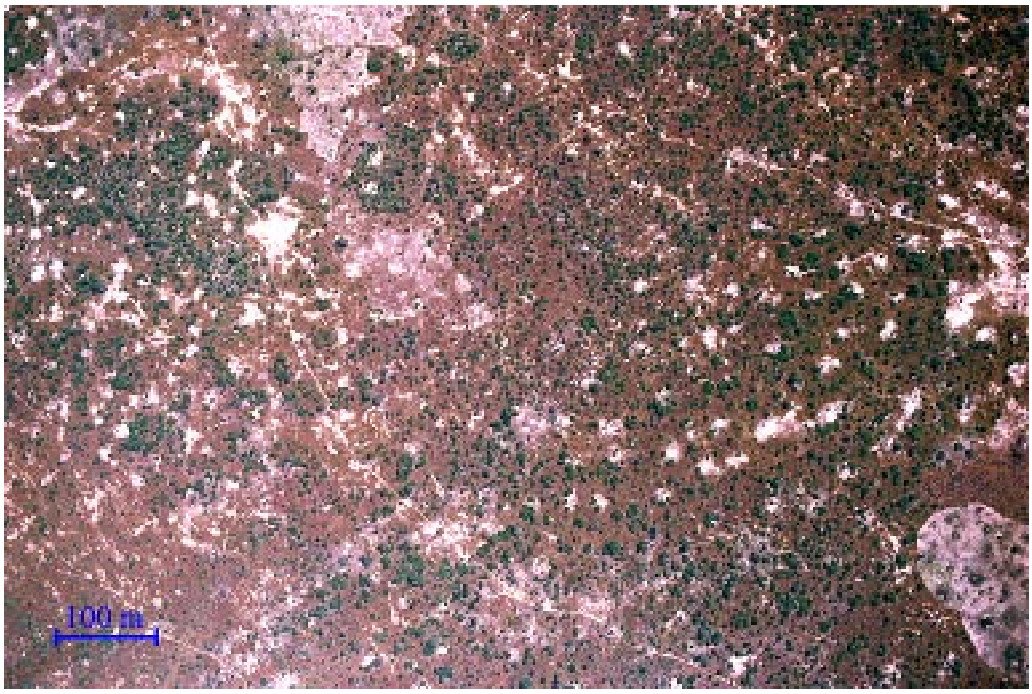


Figure 0.3 : Photographie aérienne d'un paysage typique du site d'étude (Photo Fontès 1994).

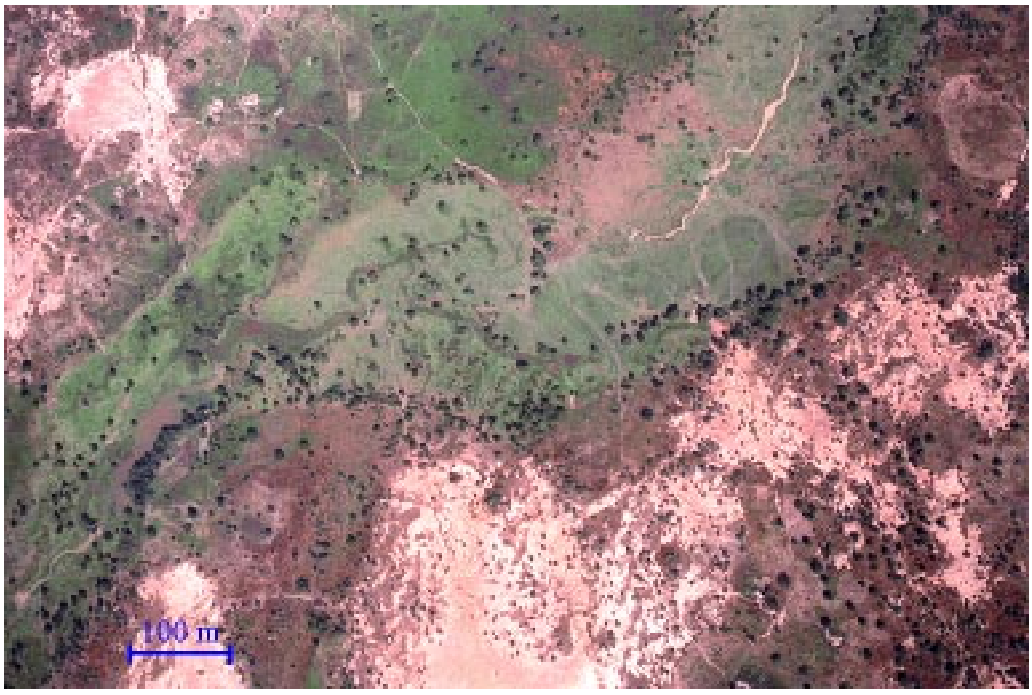


Figure 0.4 : Photographie aérienne d'un bas fond du site d'étude (Photo Fontès 1994).

Configurations de visée.

Pour cette étude, seul le cas de données acquises au nadir est considéré ; ce qui correspond aux données Landsat MSS. L'utilisation de données hors nadir complique considérablement la formule de réflectance utilisée, car la pondération n'est plus une fonction simple du taux de recouvrement. Dans un tel cas de figure il faudra utiliser le programme d'inversion défini dans le chapitre II, celui-ci pouvant utiliser tous les types de données.

La réflectance des différents éléments du paysage.

Une campagne de terrain effectuée en octobre 1995, a permis l'acquisition d'échantillons des différents types de sol et d'éléments végétaux présents sur le site test. Les caractéristiques radiométriques de ces échantillons ont été mesurées en laboratoire à l'aide d'une sphère intégrante pour les mesures hémisphériques et d'un albédomètre pour les mesures directionnelles. Le capteur utilisé est un spectromètre EOTEC fonctionnant dans la bande 500-1000 nm avec une résolution de 1,1 nm. De plus, des mesures de réflectance du sol et des feuilles ont été réalisées sur le terrain à l'aide d'un radiomètre CIMEL, fonctionnant dans les trois bandes spectrales SPOT. L'analyse des résultats nous a permis d'adopter les hypothèses simplificatrices indiquées ci-dessous :

- ***La réflectance du sol.***

  Les sols du site test sont constitués de croûtes argileuses ou argilo-sableuses, de sables, de cuirasses latéritiques et de gravillons issus de ces cuirasses. Onze échantillons de sols différents ont été reconstitués sur des supports de 10 cm de coté. Leur réflectance a été mesurée à l'aide de l'albédomètre. Leur comparaison avec les mesures terrain (Tableau 0.2), effectuées avec un radiomètre CIMEL, nous ont permis de vérifier que le fait de reconstituer les sols en laboratoire n'a pas trop influencé la réflectance, excepté dans le cas de sols très hétérogènes tels que les horizons gravillonnaires ou les fragments de cuirasse.

  La réflectance directionnelle des sols présente un aspect anisotrope (Figure 0.5), qui est cependant moins marqué que celui de la réflectance de la végétation. Nous avons donc fait l'hypothèse du caractère lambertien de la réflectance du sol. Cette hypothèse n'est pas parfaitement vérifiée, en particulier pour les milieux présentant une rugosité de surface importante. Cependant, les erreurs associées à cette approximation sont minimisées par la procédure d'inversion. Cette dernière peut en effet laisser un degré de liberté pour la réflectance du sol. Ceci est expliqué par la suite.

		Canal vert (500-600 nm)		Canal PIR (800-1000 nm)	
Sol n°	Type	Terrain	Labo	Terrain	Labo
1	croûte d'érosion	17,5	22,1	37,5	43,9
2	croûte structurale	23,4	24,1	49,5	47,8
3	gravillons sur croûte	15,2	09,1	31,0	17,3
4	croûte de décantation	29,8	33,2	50,2	50,6
5	sable nu	22,3	15,8	41,9	30,8
6	cuirasse ocre	12,0	21,9	25,6	39,7
7	cuirasse sombre	05,3	04,9	10,0	09,9
8	croûte muscinale noire	17,0	15,8	35,7	34,6
9	croûte beige	21,2	25,4	39,6	45,7
10	gravillons bas de pente	08,6	09,1	16,2	17,5
11	gravillons à mi pente	08,5	11,0	15,0	16,5

Tableau 0.2 : Réflectance au nadir des différents sols. Les directions d'éclairement pour les mesures de laboratoire sont similaires à celles des mesures de terrain.

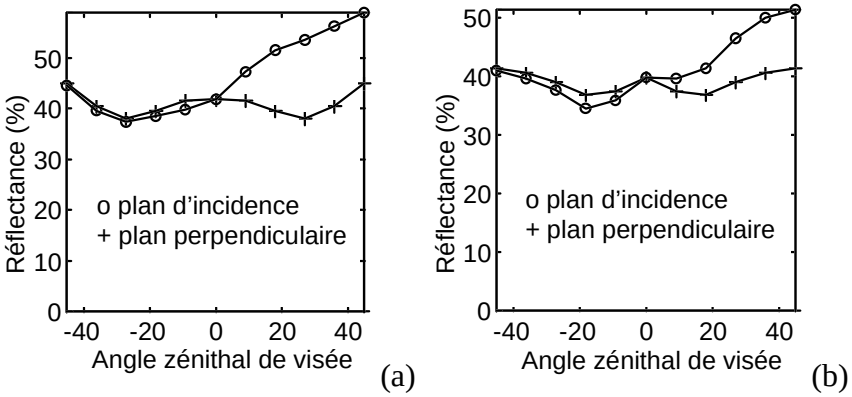


Figure 0.5 : Courbes de réflectance directionnelle à 670 nm (rouge) pour un éclairement à 45° pour les sols n° 1 (croûte d'érosion) (a) et 9 (croûte beige) (b).

Les réflectances des 11 sols sont très différentes mais présentent des variations spectrales similaires, à l'exception de la croûte muscinale (Figure 0.6). Nous avons donc fait l'hypothèse que la réflectance spectrale des différents sols pouvait être modélisée par une seule courbe (Figure 0.7), correspondant à la réflectance du sol n° 1 (le plus étendu), pondérée par un coefficient multiplicateur que l'on appellera « efficacité du sol », e_s. Cette hypothèse est valable si ce coefficient reste constant sur toute la bande spectrale considérée. A partir de 550 nm (en dessous le bruit instrumental devient très important), l'invariabilité spectrale est assez bien vérifiée (Figure 0.8) pour tous les sols à l'exception de la croûte muscinale et de la croûte de décantation. Ces deux types de sol étant très minoritaires, on retiendra cette hypothèse.

tetas=45	tetav=0			
	site 1	site 1	site1	site 2
	croute d'éros	croute structu	croute plus g	croute
466.100006	0.12991818	0.1191	0.04553636	0.33592727
467.200012	0.12991818	0.1191	0.04553636	0.33489091
468.299988	0.09962727	0.10395455	0.01524545	0.33380909
469.399994	0.09962727	0.08880909	0.01524545	0.33608182
470.399994	0.09962727	0.08880909	0.01524545	0.33305455
471.5	0.09583636	0.08501818	0.0266	0.31714545
472.600006	0.09204545	0.05472727	0.0266	0.32471818
473.600006	0.08699091	0.04967273	0.01145455	0.33380909
474.700012	0.0942	0.06986364	0.02154545	0.3524
475.799988	0.0942	0.06607273	0.0329	0.34689091
476.799988	0.09257273	0.07742727	0.0329	0.34585455
477.899994	0.09094545	0.06444545	0.0329	0.34337273
479	0.10911818	0.08261818	0.04198182	0.34528182
480	0.12729091	0.10079091	0.05106364	0.3377

Figure 0.6 : Réflectance spectrale au nadir des différents sols pour un éclairement à 45°. Le bruit visible au dessous de 550 nm et au dessus de 950 nm est dû au capteur.

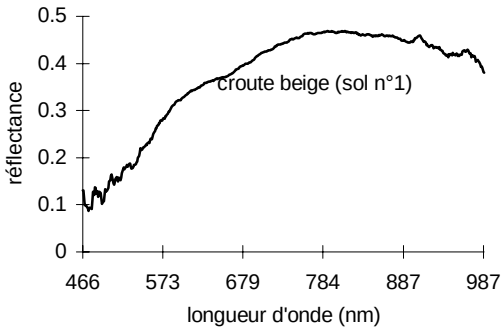


Figure 0.7 : Réflectance spectrale du sol le plus courant (croûte beige ferrique).

tetas=45				
466.100006	1	0.91673081	0.35050031	2.5856833
467.200012	1	0.91673081	0.35050031	2.57770625
468.299988	1	1.04343462	0.15302491	3.35057943
469.399994	1	0.89141345	0.15302491	3.37339173
470.399994	1	0.89141345	0.15302491	3.34300575
471.5	1	0.88711819	0.27755644	3.30923923
472.600006	1	0.5945679	0.28898765	3.52780247
473.600006	1	0.57101055	0.1316752	3.83728707
474.700012	1	0.74165219	0.22872032	3.74097665
475.799988	1	0.70140899	0.3492569	3.68249373
476.799988	1	0.83639399	0.35539625	3.73603064
477.899994	1	0.70861655	0.3617553	3.77558976
479	1	0.75714405	0.38473715	3.16429226

Figure 0.8 : Efficacité e_s de la réflectance des différents types de sol. $e_s(\lambda) = \frac{R_{sol\,i}(\lambda)}{R_{sol\,1}(\lambda)}$.

- ***La réflectance de la strate herbacée.***

  La strate herbacée a une influence importante sur la réflectance d'un pixel. Or, l'état des herbacées, et donc leur réponse spectrale, dépend fortement de la pluviométrie (Hiernaux *et al.*, 1986). En effet, le rythme biologique des herbacées se calque étroitement sur le régime des pluies, avec cependant un décalage lié au temps de réponse de la plante au facteur hydrique. Par exemple, on peut remarquer que l'évolution du NDVI NOAA (Figure 0.9) sur la région de Tougouri est fortement corrélée à la pluviométrie des jours précédant l'acquisition. Au contraire des herbacées, les ligneux ont un rythme biologique très décalé et gardent leurs feuilles longtemps après la fin de la saison des pluies. L'acquisition d'images satellitales à la fin de la saison des pluies, permet donc une meilleure séparation des ligneux (les seuls éléments encore chlorophylliens) à l'intérieur du pixel. En effet, on peut considérer qu'à cette date la strate herbacée est complètement desséchée (Figure 0.3), excepté dans les bas fonds (Figure 0.4). Cependant, on peut remarquer sur la Figure 0.9 une augmentation du NDVI NOAA, autour de Tougouri, entre l'année 1984 (NDVI=0,1) et l'année 1990 (NDVI=0,16) aux dates d'acquisition des images Landsat MSS (« * »). Cette augmentation ne peut pas correspondre à la seule augmentation du recouvrement ligneux, si tant est qu'il y en ait une. L'explication vient de la strate herbacée qui conserve une grande influence sur le signal et sur le NDVI, à la fin de la saison des pluies. Nous verrons plus loin que la plus grande précision (50 m) des images Landsat associée à notre méthode de détection de la mortalité ligneuse a permis de résoudre partiellement ce problème.

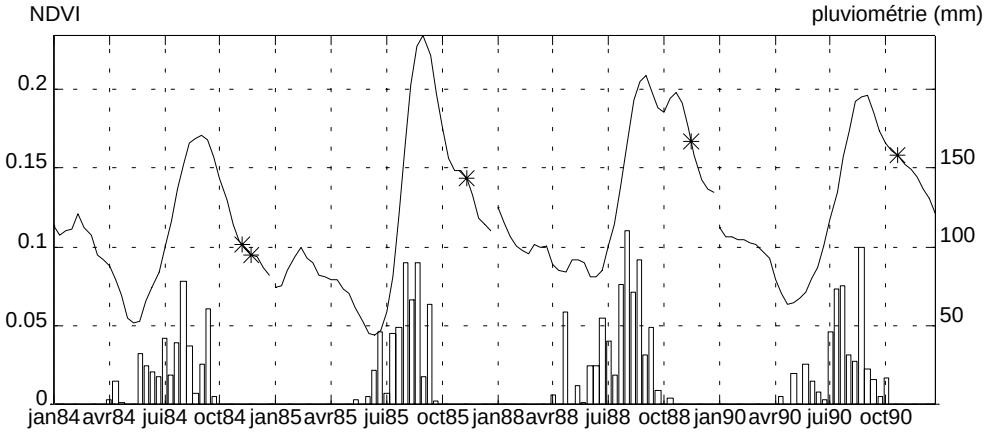


Figure 0.9 : NDVI NOAA (données FEWS) et pluviométrie décadaire autour de Tougouri pour les années 84, 85, 88 et 90. Les « * » indiquent les dates d'acquisition des images Landsat MSS.

Malgré les remarques précédentes, nous avons fait l'hypothèse selon laquelle la strate herbacée est complètement desséchée sur les images Landsat, acquises après la saison des pluies. Les réflectance et transmittance foliaires ont été mesurées sur des échantillons de feuilles desséchées de *Ctenium newtonii*, l'espèce dominante sur le site de mesure. Elles ont été utilisées pour simuler la réflectance d'un couvert herbacé à l'aide du modèle SAIL (Figure 0.10). Compte tenu des similitudes entre les réponses spectrales du sol et de la strate herbacée (Figure 0.10) nous avons utilisé la même modélisation de la réflectance spectrale pour le sol nu et pour le sol recouvert d'herbe. Cette simplification permet d'éviter l'introduction d'un troisième paramètre qui représenterait le taux de recouvrement de la strate herbacée. Pour tester la validité de cette hypothèse, nous avons calculé l'efficacité du sol e_s, pour le couvert herbacé, à partir des simulations SAIL. L'hypothèse est validée si les valeurs de e_s ne varient pas en fonction de la longueur d'onde. Les résultats (Figure 0.11) montrent malheureusement le contraire. Nous n'avons cependant pas cherché à améliorer la modélisation de la strate herbacée. L'hypothèse simplificatrice a été conservée. La réflectance spectrale du sol, qu'il soit recouvert d'herbe ou non, est donc modélisée par une courbe, celle du sol n°1 (Figure 0.7) et par un coefficient pondérateur : l'efficacité du sol e_s. Cependant, compte tenu de l'erreur commise par cette modélisation, la strate herbacée pourra être considérée comme un bruit susceptible d'influencer les résultats d'inversion. La procédure de validation qui suit nous permettra de dire si la modélisation adoptée est suffisamment précise pour permettre de retrouver le taux de recouvrement ligneux avec une précision satisfaisante.

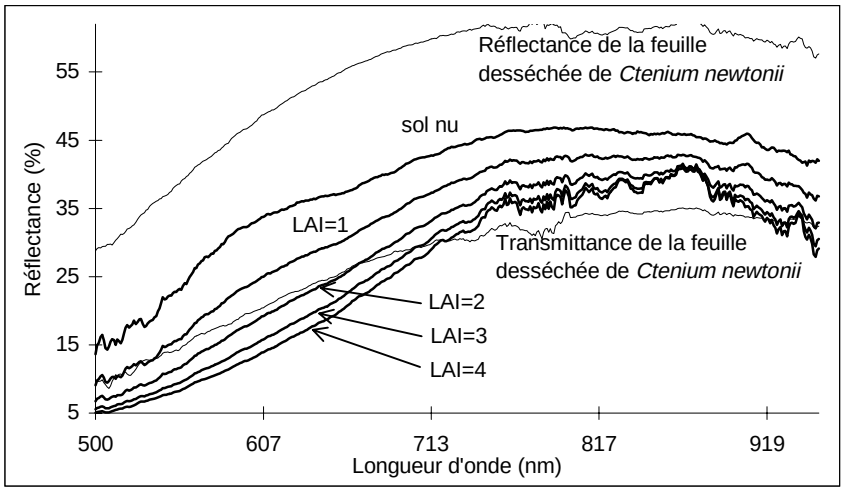


Figure 0.10 : Réflectances de la strate herbacée simulées avec le modèle SAIL.

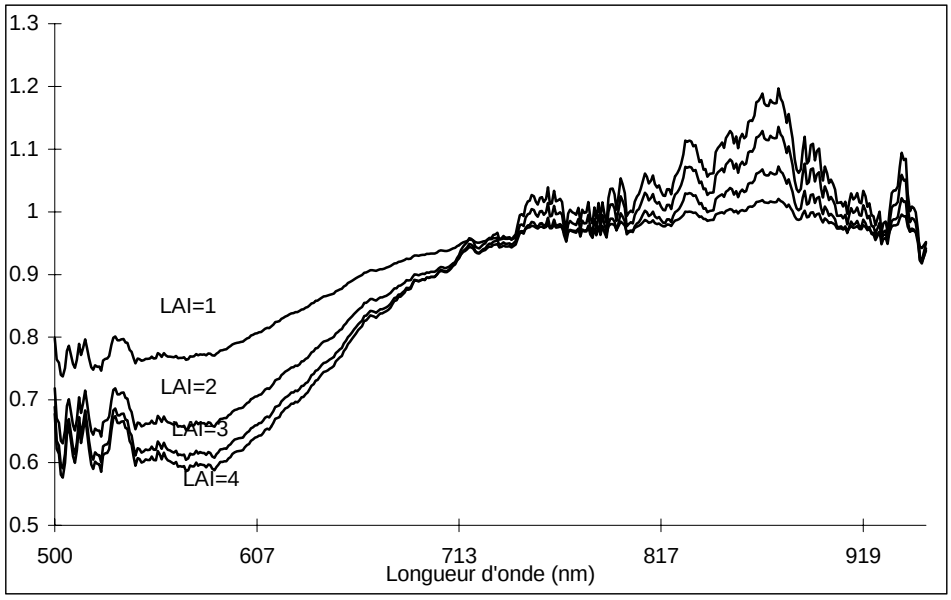


Figure 0.11 : Efficacité e_s de la réflectance de la strate herbacée obtenue par simulation.

- ***La réflectance des arbustes.***

  Les différentes campagnes de mesures sur le terrain (Fontès *et al.,* 1995) ainsi que notre connaissance du milieu nous ont permis de définir un arbuste moyen, représentatif du paysage dominant sur la région d'étude. Cet arbuste est modélisé par une sphère d'un diamètre de 3,5 m. Les caractéristiques foliaires utilisées sont celles de l'espèce la plus courante : *Combretum micranthum*. Une maquette a été constituée afin de simuler la réflectance d'un tel arbuste avec le modèle DART. Celui-ci permet de prendre en compte la structure du couvert, élément indispensable pour pouvoir intégrer et quantifier les phénomènes non linéaires tels que les effets d'ombre. La réflectance apparente d'un arbre dépend évidemment de son environnement et dans une moindre mesure, si la densité des arbres est faible, des arbustes voisins. Cependant, pour simuler ce dernier phénomène, il est nécessaire de connaître la disposition des arbres dans le paysage. Or ce paramètre, très variable, étant indisponible, nous nous sommes contentés d'une modélisation très simple et nous avons négligé l'influence des arbustes voisins.

  Les paramètres utilisés en entrée du modèle DART sont décrits ci-dessous :

  - La maquette comprend un arbre sur une surface de sol nu de dimension suffisamment étendue pour pouvoir négliger les diffusions multiples entre les arbustes et pour pouvoir mesurer la surface de l'ombre projetée.
  - Les propriétés optiques foliaires (Tableau 0.3) sont celles mesurées sur des feuilles de *Combretum micranthum* (Figure 0.12).

- La distribution angulaire foliaire est sphérique.
- Trois valeurs de LAI : 2, 3 et 4 ont été testées. Le LAI est ici défini comme la surface foliaire divisée par la surface au sol du houppier. C'est un LAI par arbre. Ces trois valeurs ont été choisies grâce à notre connaissance du terrain. La validation ultérieure du taux de recouvrement obtenu par inversion, justifiera ou non le choix de ces valeurs.
- La réflectance du sol nu (Tableau 0.3) est celle mesurée pour le sol n°1.
- Les angles solaires correspondant à ceux des images satellitales ont été utilisés.
- Les simulations ont été réalisées pour les trois canaux spectraux MSS4, 5 et 7.
- La diffusion atmosphérique a été prise en compte lors des simulations sous la forme d'un flux incident isotrope. Celui-ci a été calculé à l'aide du modèle 6S pour chaque canal et chaque valeur de l'angle d'éclairement. Les paramètres atmosphériques utilisés sont les valeurs moyennes du modèle 6S pour la zone géographique considérée.

$\lambda(\mu m)$	$\rho_{f\ sup}$	$\rho_{f\ inf}$	τ_f	ρ_s
0.5 à 0.6	0.14	0.18	0.10	0.25
0.6 à 0.7	0.11	0.16	0.07	0.38
0.8 à 1.1	0.48	0.47	0.43	0.46

Tableau 0.3 : Réflectance foliaire face supérieure ($\rho_{f\ sup}$), face inférieure ($\rho_{f\ inf}$), transmittance foliaire (τ_f) et réflectance du sol (ρ_s) utilisées lors des simulations.

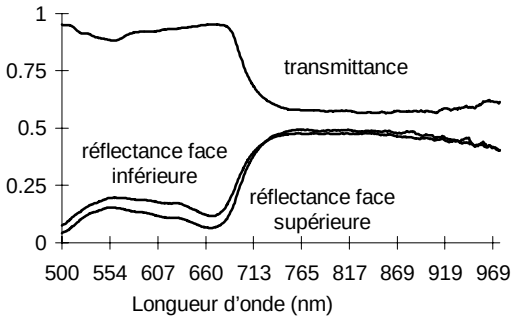


Figure 0.12 : Réflectance et transmittance hémisphériques foliaires du *Combretum micranthum.*

Mise en place du modèle de réflectance du paysage.

Le modèle est basé sur l'hypothèse selon laquelle la réflectance du paysage est égale à la somme des réflectances apparentes des arbres et du sol pondérées par leurs taux de

recouvrement respectifs. La réflectance apparente des arbres et du sol est calculée à l'aide des simulations DART.

On appelle n_s le nombre de pixels de sol, n_{so} le nombre de pixels de sol à l'ombre et n_{se} le nombre de pixels de sol éclairés directement par le soleil et par le rayonnement diffusé par l'arbre. n_s-n_{so}-n_{se} donne le nombre de pixels de sol où l'influence de l'arbre sur la réflectance du sol est négligeable. n_a correspond au nombre de pixels de couronne d'arbre (Figure 0.13). Le nombre de pixels de la scène est $n=n_s+n_a$. Le taux de recouvrement vaut $\tau = \frac{n_a}{n}$.

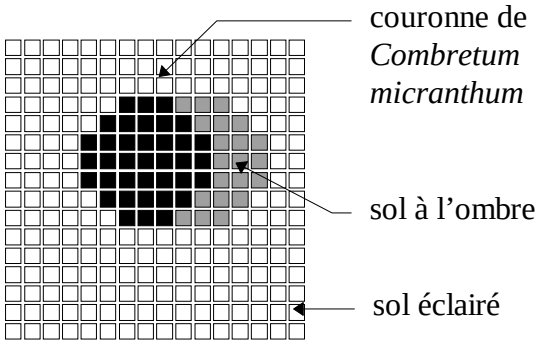


Figure 0.13 : Scène simulée.

Soit R_s la réflectance d'un pixel de sol, $\alpha_o \times R_s$ la réflectance apparente d'un pixel de sol à l'ombre, $\alpha_e \times R_s$ la réflectance apparente d'un pixel de sol éclairé par le soleil et par le flux diffusé par l'arbre et R_a la réflectance apparente d'un pixel de la couronne. Les réflectances de la couronne à l'ombre et au soleil n'ont pas été distinguées. En effet, en première approximation, R_a est une caractéristique de l'arbre indépendante du taux de recouvrement, du moins tant que les interactions entre ligneux peuvent être négligées.

Le type d'un pixel (n_{so} ou n_{se}) est défini grâce à un seuil sur sa réflectance par rapport à la réflectance de base R_s.

La réflectance simulée de la scène $R_{simulée}$ peut être calculée par la fonction mathématique suivante : $$R_{simulée} = \frac{(n_s - n_{so} - n_{se}) \times R_s + n_{so} \times R_s \times \alpha_o + n_{se} \times R_s \times \alpha_e + n_a \times R_a}{n} \quad (1)$$

On définit les paramètres $\varepsilon_o = \frac{n_{so}}{n_a}$ et $\varepsilon_e = \frac{n_{se}}{n_a}$.

$$R_{simulée} = (1 - (\varepsilon_o + \varepsilon_e + 1) \times \tau) \times R_s + \varepsilon_o \times \tau \times R_s \times \alpha_o + \varepsilon_e \times \tau \times R_s \times \alpha_e + \tau \times R_a \quad (2)$$

$(\varepsilon_o + \varepsilon_e + 1) \times \tau$ doit être inférieur à 1. L'expression ci-dessus n'est pas valable pour des valeurs importantes du taux de recouvrement τ. En effet, dans ce cas l'ombre ne se projette pas entièrement sur le sol mais aussi sur les arbres environnants. Sur la zone étudiée, ce cas se rencontre localement. Mais le taux de recouvrement moyen dans un pixel de 76 m de coté (pixel Landsat) dépasse rarement 40%, la valeur de $(\varepsilon_o + \varepsilon_e + 1) \times \tau$ reste donc inférieure à 1.

L'expression mathématique (2) dépend uniquement d'un paramètre libre : le taux de recouvrement τ. Les autres paramètres sont calculés à partir des simulations DART ou directement dérivés de mesure. Ils dépendent tous de la longueur d'onde considérée.

La variabilité sur le terrain de la réflectance du sol ou du sol recouvert d'herbe est prise en compte grâce à l'introduction dans la formule 2 du paramètre e_s (efficacité du sol). La réflectance d'un pixel Landsat peut donc être donnée par la formule suivante :

$$R_{Pixel\ Landsat} = \left(1-\left(\varepsilon_o+\varepsilon_e+1\right)\times\tau\right)\times R_s\times e_s+\varepsilon_o\times\tau\times R_s\times e_s\times\alpha_o+\varepsilon_e\times\tau\times R_s\times e_s\times\alpha_e+\tau\times R_a$$

$$R_{Pixel\ Landsat} = \left(1+\left(\varepsilon_o\left(\alpha_o-1\right)+\varepsilon_e\left(\alpha_e-1\right)-1\right)\times\tau\right)\times e_s\times R_s+\tau\times R_a\,.$$

Cette expression peut s'écrire :

$R_{Pixel\ Landsat} = \left(1+\beta\times\tau\right)\times e_s\times R_s+\tau\times R_a$ (3) avec $\beta=\varepsilon_o\times\left(\alpha_o-1\right)+\varepsilon_e\times\left(\alpha_e-1\right)-1$

Les phénomènes d'ombre et de diffusion par la végétation et par l'atmosphère dépendent de la longueur d'onde considérée. La valeur des paramètres ε_o, α_o, ε_e, α_e, R_s, R_a et β est donc calculée pour chaque canal spectral.

$$R_{Pixel\ Landsat}(canal\ spectral)=\left(1+\beta(canal\ spectral)\times\tau\right)\times e_s\times R_s(canal\ spectral)+\tau\times R_a(canal\ spectral)$$

Dans cette expression β et R_a sont calculés à partir d'une simulation DART par canal, R_s est issue des mesures terrain, alors que τ et e_s sont les paramètres libres recherchés par inversion.

Inversion du modèle de réflectance.

L'inversion de l'expression mathématique ainsi obtenue a été réalisée en minimisant la fonction coût ε^2 en utilisant la procédure du simplexe extraite de « *numerical recipies in C* ».

$$\varepsilon^2=\left(R_{\text{modèle}}\,(\text{MSS4})-R_{\text{mesurée}}\,(\text{MSS4})\right)^2+\left(R_{\text{modèle}}\,(\text{MSS5})-R_{\text{mesurée}}\,(\text{MSS5})\right)^2+\left(R_{\text{modèle}}\,(\text{MSS7})-R_{\text{mesurée}}\,(\text{MSS7})\right)^2$$

Ce choix a été guidé par le fait que notre objectif n'était pas de rechercher l'algorithme d'inversion le plus efficace, mais plutôt de montrer l'intérêt de la modélisation et de l'inversion pour l'analyse d'images satellitales en vue de la recherche de paramètres biophysiques. La méthode du simplexe, réputée pour fonctionner correctement dans la plupart des cas simples, a donc été retenue. Il est évident que d'autres algorithmes peuvent être plus robustes ou plus rapides. La procédure d'inversion appliquée à chaque pixel, permet d'obtenir la valeur du taux de recouvrement τ et de l'efficacité de sol e_s. Les résultats sont enregistrés dans des fichiers images codés sur un octet. Un facteur multiplicatif 255 est appliqué sur le taux de recouvrement et 100 sur l'efficacité du sol.

Test de robustesse de l'inversion.

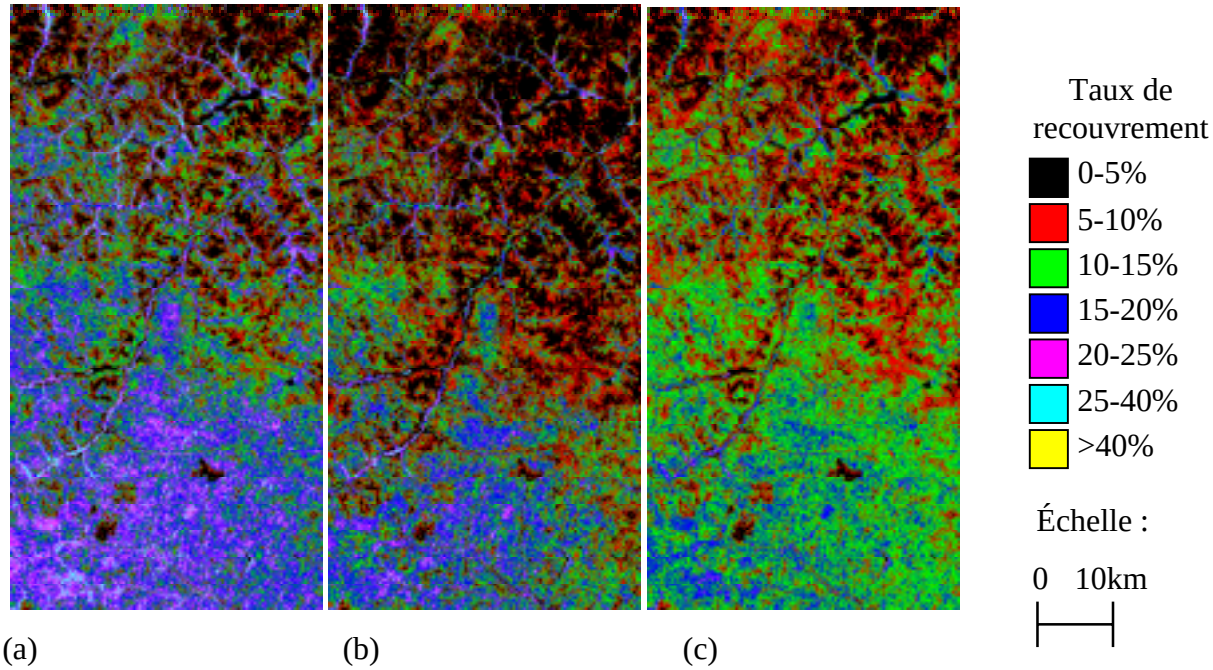
Un jeu de données de réflectances $R_{Pixel\ Landsat}$*(canal spectral)* dans les trois bandes spectrales (MSS4, MSS5 et MSS7) a été simulé en faisant varier l'efficacité du sol e_s dans l'intervalle [0.5-1.5] et le taux de recouvrement τ dans l'intervalle [0-0.4], ce qui correspond aux cas les plus courants. Un bruit blanc proportionnel a été ajouté aux réflectances simulées : $R'=R+\Delta R$ avec $|\Delta R| < \varepsilon \times R$. ε est le niveau de bruit. A partir de ce jeu bruité, on peut calculer par inversion les valeurs de e'_s et de τ' correspondant à R'. La sensibilité au bruit est représentée par le coefficient de détermination (r^2) et par le RMSE calculés entre les paramètres initiaux e_s et τ et ceux obtenus par inversion e'_s et τ'. Le Tableau 0.4 montre les résultats de robustesse concernant le taux de recouvrement τ. Le paramètre d'efficacité du sol n'est pas utilisé dans la suite de l'étude pour l'aspect thématique. Quelle que soit la valeur de LAI, pour des valeurs raisonnables de bruit (inférieures à 5%), le coefficient de détermination (r^2) est important, le biais est nul et le RMSE est très faible. On peut donc considérer que la procédure d'inversion est robuste.

Niveau de bruit ε		1%	2%	5%	10%	20%	50%
RMSE	LAI=2	0,006	0,012	0,030	0,057	0,108	0,287
	LAI=3	0,005	0,009	0,023	0,045	0,085	0,178
	LAI=4	0,004	0,007	0,020	0,039	0,074	0,157
r^2	LAI=2	0,997	0,989	0,935	0,788	0,482	0,080
	LAI=3	0,998	0,993	0,960	0,861	0,620	0,168
	LAI=4	0,999	0,995	0,970	0,893	0,684	0,224

Tableau 0.4 : Robustesse de la procédure d'inversion sur le paramètre τ pour différentes valeurs de bruit et les 3 valeurs de LAI.

Résultats de l'inversion et validation.

L'inversion des dix images Landsat MSS a permis d'obtenir dix images de taux de recouvrement. Il est apparu que la valeur de ce paramètre dépend fortement de la valeur de LAI utilisée dans les simulations (Figure 0.14). La comparaison des valeurs obtenues par inversion avec des mesures sur le terrain est donc indispensable pour déterminer la valeur optimale de LAI. Ce travail est présenté plus loin. Cependant, il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec les trois valeurs de LAI. Par rapport au cas LAI=3, l'utilisation des valeurs 2 et 4 pour le LAI implique une sous estimation des surfaces de sol nu et donc une sur estimation du taux de recouvrement global (Tableau 0.5).



(a) (b) (c)

Figure 0.14 : Images du taux de recouvrement en 1988. Les valeurs de LAI utilisées dans les simulations sont respectivement 2 (a), 3 (b) et 4 (c).

τ	LAI=2	LAI=3	LAI=4
0-5%	15,6	33,1	16,8
5-10%	18,3	25,5	31,8
10-20%	52,0	37,9	50,8
20-30%	13,9	03,5	00,6
30-100%	00,2	00,0	00,0

Tableau 0.5 : Proportions de plusieurs classes de taux de recouvrement τ dans les images obtenues par inversion, pour les trois valeurs de LAI.

Validation des résultats à partir de photographies aériennes noir et blanc.

Une première validation a été réalisée à partir de photographies aériennes noir et blanc de « l'Institut Géographique du Burkina », acquises sur le site d'étude en 1983. Le traitement complet du site (40 × 80 km) représentant un travail considérable, nous avons sélectionné dix zones représentatives de la diversité du paysage (Figure 0.15). A l'intérieur de ces zones, des plages homogènes ont été délimitées par photo-interprétation et classées en fonction de leur taux de recouvrement, par tranche de 5% (Figure 0.16). La validation a consisté à identifier ces plages sur l'image Landsat du 21/11/1984, la plus proche de la date des photographies, et à comparer la valeur de taux de recouvrement mesurée par photo-interprétation à celle obtenue par inversion. Il ressort de ce travail que la valeur de LAI la mieux adaptée est 3, et que les images obtenues par inversion avec cette valeur permettent :

- une bonne discrimination des surfaces de sol nu quel que soit le type de sol.

- une bonne délimitation des surfaces recouvertes de ligneux. La méthode permet même de faire apparaître des détails presque invisibles sur les photographies aériennes tels que des petits arbustes sur les cuirasses latéritiques.
- une sensibilité importante à la strate herbacée. Ceci montre la grande importance de la date d'acquisition et de la pluviométrie.

La présence d'eau dans les bas fonds permet à la strate herbacée de rester chlorophyllienne longtemps après la fin de la saison des pluies, si bien que la procédure d'inversion ne peut discriminer les ligneux des herbacées sur ces zones. En dehors de ces sites, le taux de recouvrement calculé par inversion n'est jamais inférieur à celui obtenu par photo-interprétation et ne dépasse pas celui-ci de plus de 5% en absolu. La précision des résultats de l'inversion est donc compatible avec l'objectif écologique de l'étude : le suivi de l'évolution inter annuelle des ligneux.

La validation réalisée n'a pas permis de préciser l'erreur au delà de sa valeur maximale en absolu. La méthode utilisée n'est pas suffisamment systématique et fait appel à l'interprétation de l'opérateur. Afin d'améliorer les résultats de validation, nous avons développé une procédure plus complexe basée sur des photographies aériennes couleur à très haute résolution spatiale, associées à une méthode informatique simple de calcul du taux de recouvrement ligneux. Nous n'avons malheureusement pas encore pu réaliser la campagne de photographie aérienne préalable à l'application de la méthode. L'étape de développement a cependant permis de mettre en évidence les principales difficultés de l'opération.

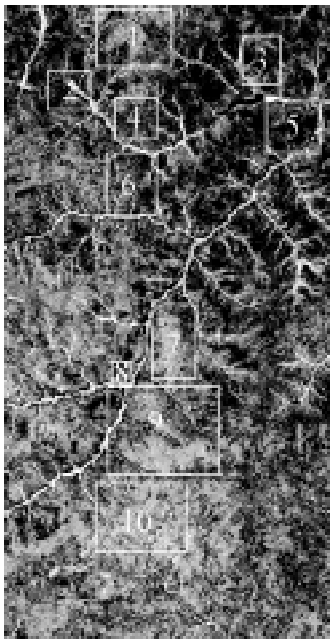


Figure 0.15 : Localisation à l'intérieur de l'image satellitale des 10 zones utilisées pour la validation.

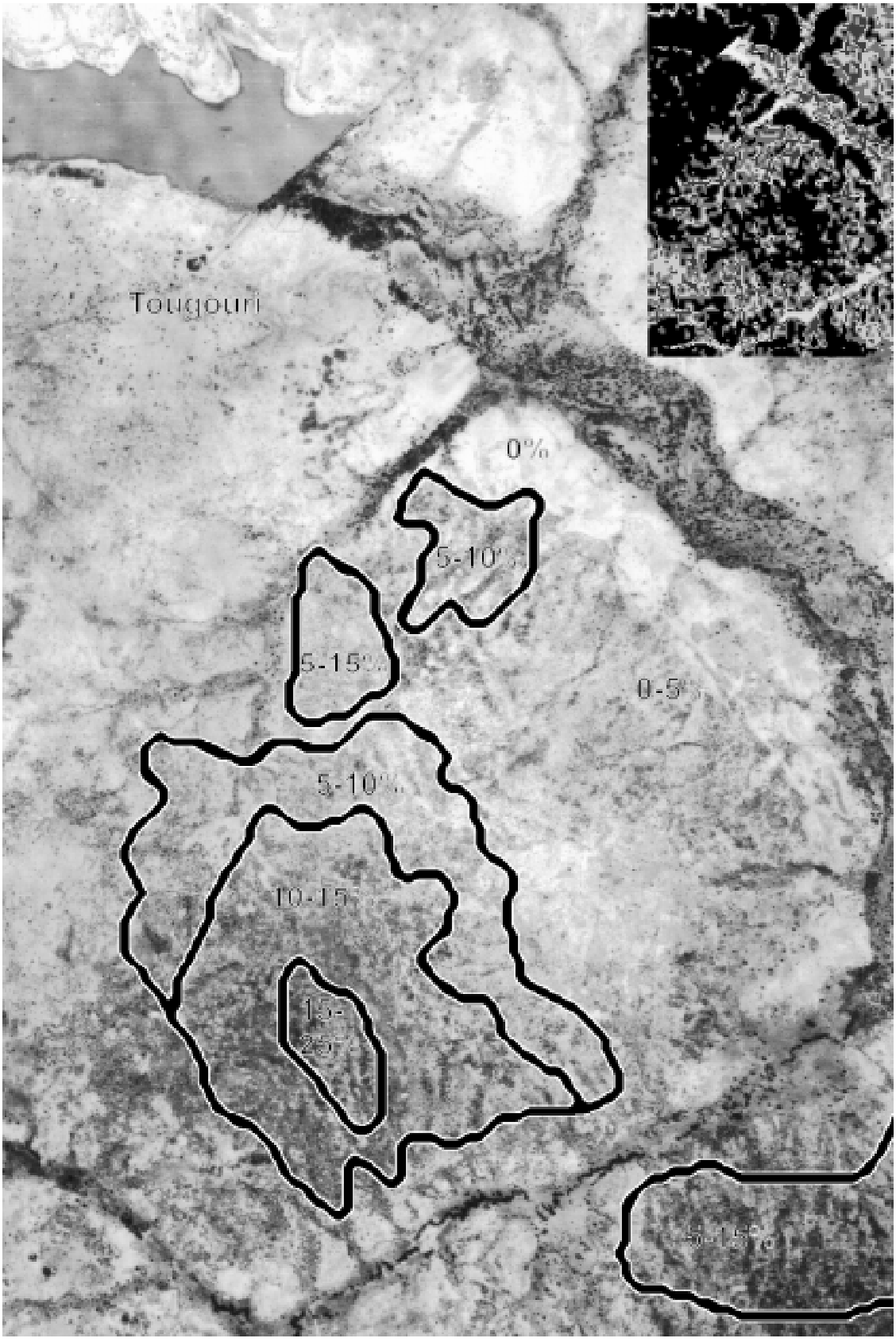


Figure 0.16 : Photographie aérienne (IGB) interprétée à l'intérieur de la zone 2 (Figure 0.15). En haut à droite, l'image du taux de recouvrement calculée par inversion.

Mise au point d'un protocole de validation systématique.

Afin d'améliorer l'aspect opérationnel de la validation, nous avons cherché à obtenir de manière précise et systématique, des images du taux de recouvrement ligneux comparables à celles obtenues par inversion. Pour arriver à ce résultat quelles données devait-on acquérir et quelle méthode de traitement pouvait être utilisée ?

Concernant le type de données, pour des raisons de coût, nous avons retenu la photographie aérienne couleur obtenue avec un boîtier standard 24 × 36 à partir d'un avion léger. Restait à définir les paramètres de vol et de prise de vue, ainsi que les différents traitements pour arriver aux images de taux de recouvrement. Une étude préalable a permis de répondre à ces questions. Différents traitements ont été envisagés et testé sur un jeu de photographies aériennes acquis en 1994 (Fontès *et al.*, 1995).

- ***Traitement numérique des photographies.***

  Afin d'obtenir une chaîne de traitement automatique, il est nécessaire de passer par le codage numérique de la photographie. L'utilisation de fichiers numériques permet en outre l'utilisation de procédures automatiques de détection de pixel ligneux et donc de calcul du taux de recouvrement, mais surtout elle permet l'intégration dans un système d'information géographique (SIG) et donc un géoréférencement facile par rapport à l'image satellitale.

- ***La Numérisation.***

  Un film négatif couleur 24×36, de sensibilité 100 ASA, utilisé avec un objectif standard, a une résolution de 2000×3000 pixels. La numérisation par les laboratoires Kodak sous forme de photo cd est intéressante puisqu'elle atteint cette résolution pour un coût relativement faible. Cependant, la compression utilisée dégrade la précision des couleurs par rapport à la numérisation obtenue avec un scanner de négatif qui atteint elle aussi cette résolution pour un coût abordable. Ces deux possibilités peuvent être utilisées de manière opérationnelle.

- ***Le géoréférencement.***

  Afin d'assurer le positionnement avec une erreur inférieure à la résolution de l'image satellitale (50m), il est nécessaire de disposer d'une surface couverte de l'ordre de 15×15 km, soit par une seule photographie, soit par une série. Cette surface correspond aux photographies de « l'Institut Géographique Burkinabé » au 50000ème. Elle permet de

repérer un nombre suffisant de points remarquables, tels que les bas fonds ou les cuirasses, qui peuvent servir de points d'amer pour le géoréférencement.

- ***Le calcul du taux de recouvrement.***

  La mesure du taux de recouvrement par photo-interprétation est longue et fastidieuse et peut dépendre fortement de l'opérateur. Nous avons donc décidé de mettre au point une procédure automatique de détection des pixels ligneux sur les images numérisées. Ceci permet par moyennage de calculer le taux de recouvrement. Ce type de méthode n'est pas nouveau. Il a déjà été utilisé avec succès dans différentes études (Defourny, 1992). La sélection peut être effectuée soit en utilisant un programme simple basé sur l'utilisation de seuils dans les différents canaux, soit à l'aide de méthodes de classification traditionnelles (méthodes des bornes, maximum de vraisemblance). Ces deux démarches ont été testées et comparées.

- ***Mise au point d'un programme simple de sélection des pixels ligneux.***

  Un programme en langage « C » a été créé pour lire directement les photographies numérisées au format TIFF. Il sélectionne les pixels ligneux et crée une image binaire ligneux/non ligneux. Le test ligneux/non ligneux est défini à la Figure 0.17. Il est basé sur la définition de quatre paramètres r_1, r_2, v_1, et v_2. Cette étape est évidemment la plus délicate et est réalisée visuellement. Pour cela, le programme crée une image composée en indiquant les pixels ligneux retenus sur l'image d'origine à l'aide d'une couleur particulière (Figure 0.18). L'opérateur peut, par visualisation instantanée du résultat, adapter les quatre paramètres. Cette étape impose une contrainte sur la résolution spatiale des images numérisées : il est nécessaire de pouvoir distinguer les ligneux sur l'écran.

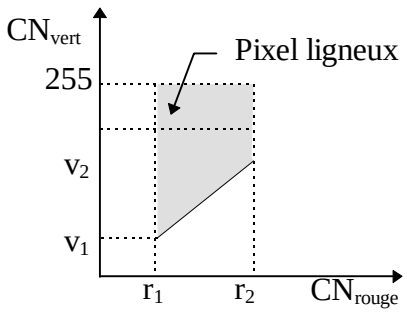


Figure 0.17 : Critère de sélection des pixels ligneux.

- ***Sélection des pixels ligneux par classification.***

  Les photographies numérisées ont aussi été traitées par classification. La définition de classes « ligneux » par prise d'échantillons permet d'obtenir finalement une image binaire ligneux/non ligneux et donc de déterminer le taux de recouvrement. La résolution de l'image doit ici être suffisante pour pouvoir prendre des échantillons « ligneux ». La

classification des photographies a été réalisée avec la méthode du maximum de vraisemblance du SIG ILWIS.

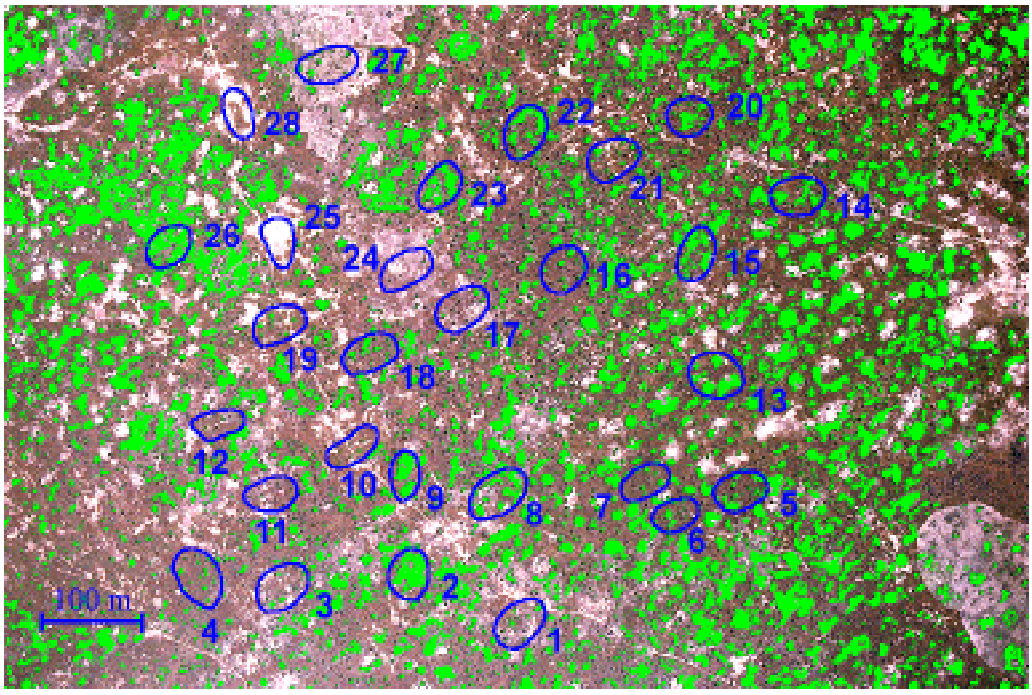


Figure 0.18 : Photographie numérique n°1 intégrant, en vert clair, l'image binaire d'extraction interactive des ligneux (Photo Fontès 1994).

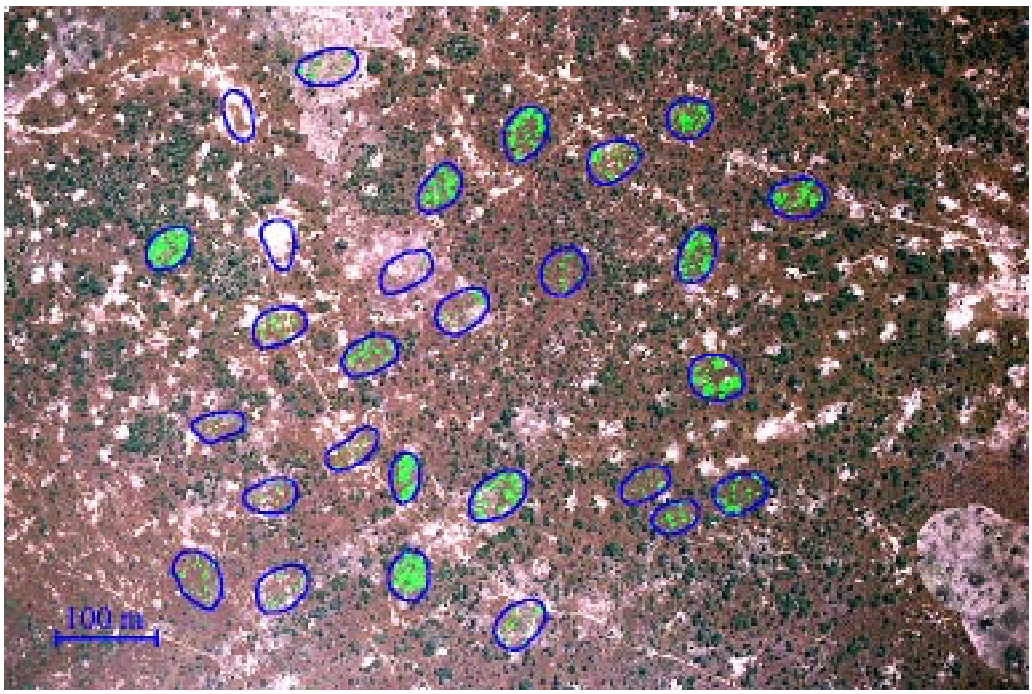


Figure 0.19 : Photographie numérique n°1. En vert clair les ligneux sélectionnés par photo-interprétation à l'intérieur des parcelles de validation (Photo Fontès 1994).

- ***Comparaison des deux méthodes.***

  Afin d'évaluer les résultats des deux méthodes, trois photographies de la série de 1994 ont été traitées. Les résultats des calculs de taux de recouvrement ont été comparés à ceux obtenus par photo-interprétation (Figure 0.19). Les différentes étapes sont résumées sur l'organigramme de la Figure 0.20. Le problème de la résolution spatiale des photographies numérisées a été abordé. Pour cela, la résolution des images a été progressivement dégradée jusqu'à une taille maximale de pixel à partir de laquelle la détection des pixels ligneux est impossible. La photo-interprétation a été réalisée de la manière suivante : la surface couverte par les ligneux a été dessinée sur un calque superposé à un agrandissement de la photographie. Ce calque a ensuite été numérisé pour obtenir une image binaire ligneux/non ligneux. Cette image a été rééchantillonnée pour pouvoir être superposée à la photographie numérisée d'origine. Des parcelles « échantillons » ont été définies à l'intérieur de chaque photographie, pour pouvoir effectuer la comparaison des valeurs de taux de recouvrement. Ainsi 28 parcelles ont été analysées sur la photographie n°1 . La taille du pixel (0,35m) des images « pleine résolution » est calculée avec une échelle moyenne de 1/6000ème sur tirage 18×12.

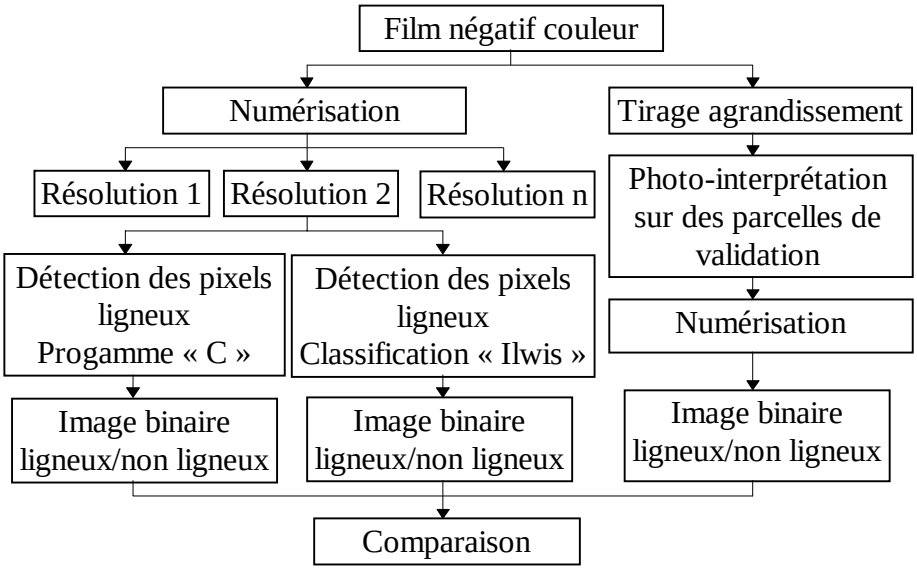


Figure 0.20 : Traitement numérique des photographies et validation.

La comparaison entre les deux méthodes à pleine résolution et la photo-interprétation est résumée sur la Figure 0.21. Il apparaît une bonne concordance particulièrement pour les parcelles à fort taux de recouvrement (n°2, n°9 et n°26 par exemple). Pour certaines parcelles (n°1, n°3, n°4, n°10, n°11 et n°12), les procédures automatiques sous-estiment le taux de recouvrement. En effet, elles sont situées dans le quart inférieur gauche de la photographie, zone surexposée de l'image. Ce phénomène peut être dû à la présence d'aérosols, à la qualité de l'objectif ou encore à l'angle de phase entre les directions d'éclairement et de visée. Pour les zones à taux de recouvrement faible ou moyen (n°17, n°18 et n°19) les écarts relatifs entre les procédures automatiques et la photo-interprétation peuvent être importants, avec des valeurs plus fortes pour la photo-interprétation. Outre l'imprécision des procédures automatiques, une des raisons peut être la tendance du photo-interprète à confondre les ombres et les ligneux, et à agglomérer les arbustes très proches. Concernant le choix de la résolution spatiale, les résultats de la première méthode indiquent que pour une taille de pixel inférieure ou égale à 1,4 m, le calcul du taux de recouvrement est possible avec une précision moyenne de 4 à 7% en absolu (Tableau 0.6). De plus, cette résolution autorise une interprétation visuelle correcte de l'image, car les ligneux sont encore bien distingués, ce qui n'est plus le cas au delà. On choisira donc cette taille de pixel. Une dimension inférieure augmenterait inutilement le volume de données à traiter. Une image de 3000×2000 pixels permet donc de couvrir une surface de 4,2×2,8 km.

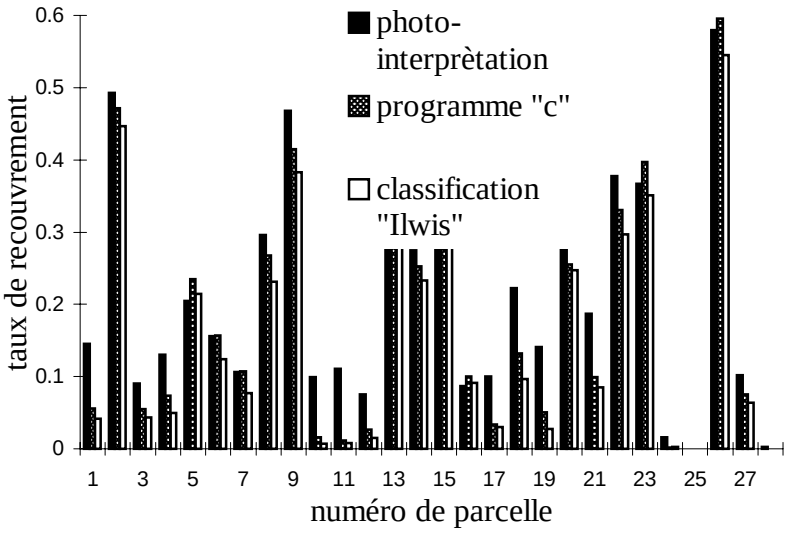


Figure 0.21 : Taux de recouvrement pour la photographie n°1 (résolution 0,35 m). Les numéros de parcelles correspondent à ceux de la Figure 0.18

En ce qui concerne le choix de la méthode de traitement numérique, le programme « C » donne de meilleurs résultats que la classification ILWIS (Tableau 0.6). Son intérêt principal

est l'obtention facile des bornes (r_1, r_2, v_1 et v_2) directement en fonction du résultat escompté. Les principales limites sont la simplicité du test ligneux/non ligneux utilisé qui peut ne pas être adapté à toutes les situations (présence d'une strate herbacée chlorophyllienne) et les qualités d'interprétation de l'opérateur. Au contraire, les méthodes traditionnelles de classification ne permettent pas en général d'optimiser facilement l'échantillonnage en vue du résultat escompté. Cependant, un de leurs atouts est de pouvoir choisir plusieurs classes de ligneux lorsque cela est nécessaire.

En résumé, si l'opérateur interprète correctement l'image sur l'écran de l'ordinateur et si le test de sélection des ligneux est adapté à l'image traitée, la méthode interactive développée ici sera plus rapide, pour une même précision. Par contre, si ces conditions ne sont pas remplies, la classification peut être préférable.

	Taille du pixel (m)	0,350	0,700	1,400	2,800	5,600
Photo 1	RMSE programme « C »	0,052	0,053	0,056	0,068	0,089
28 parcelles	RMSE classification ILWIS	0,064	0,059	0,052	0,056	0,084
Photo 2	RMSE programme « C »	0,041	0,039	0,039	0,054	0,088
15 parcelles	RMSE classification ILWIS	0,083	0,075	0,100	0,093	0,137
Photo 3	RMSE programme « C »	0,066	0,065	0,069	0,081	0,100
25 parcelles	RMSE classification ILWIS	0,098	0,139	0,120	0,059	0,076

Tableau 0.6 : Erreurs sur les valeurs de taux de recouvrement calculées par les deux méthodes. L'analyse par photo-interprétation sert de référence

- ***Condition d'acquisition des photographies.***

  Vitesse d'obturation.

  Le déplacement de l'avion pendant la durée d'ouverture de l'obturateur provoque un flou. Ainsi, considérons un avion léger qui vole à la vitesse de croisière de 120 km/h, soit 33,3 m/s. Le déplacement de l'avion pendant la durée d'ouverture de l'obturateur peut donc être calculé en fonction de la vitesse d'obturation. Il doit être compatible avec la résolution du pixel après numérisation. Le Tableau 0.7 indique que les vitesses standards (supérieures au $1/125^{ème}$) sont compatibles avec la résolution à priori sélectionnée : 1,4 m.

vitesse d'obturation (s)	1/500	1/250	1/125	1/50	1/25
déplacement de l'avion (m)	0.07	0.13	0.27	0.67	1.33

Tableau 0.7: Déplacement de l'avion en fonction de la vitesse d'obturation.

Influence de la focale sur les déformations aux extrémités.

La surface apparente des ligneux isolés augmente avec la direction de visée en $\frac{1}{\cos(\alpha)}$ (Figure 0.22). Pour un négatif 24×36 la valeur maximale de α est $\tan(\alpha) = \frac{\sqrt{18^2 + 12^2}}{f}$ avec f la focale de l'objectif. Le Tableau 0.8 indique l'erreur relative maximale sur la mesure du taux de recouvrement en fonction de la focale. Cette erreur est maximale uniquement dans les coins, et n'influencera donc pas le choix de la focale.

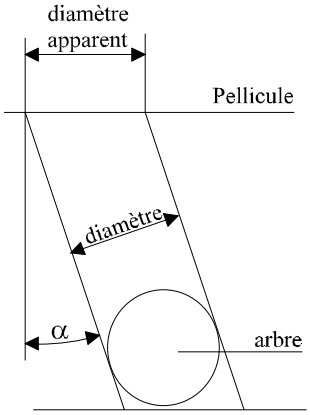


Figure 0.22 : Surface apparente d'un arbuste en fonction de l'angle de visée.

f	α (°)	$\frac{1}{\cos(\alpha)}$	augmentation relative du taux (%)
200	6,2	1,006	0,6
135	9,1	1,013	1,3
80	15,1	1,036	3,6
50	23,4	1,090	9,0
35	31,7	1,176	17,6
28	37,7	1,264	26,4

Tableau 0.8 : Surestimation maximale du taux de recouvrement pour un ligneux isolé en fonction de la focale *f*.

Influence des effets atmosphériques.

L'atmosphère intervient sur la lumière reçue par l'appareil photographique par sa transmittance et par sa diffusion. Plus la lumière traversera d'atmosphère plus elle sera

perturbée. Les effets atmosphériques dépendent de l'altitude de l'avion mais aussi de l'angle de visée. Ils ne seront donc pas répartis de manière égale sur la photographie. Une solution peut consister dans les cas extrêmes à appliquer à la photographie numérisée une correction atmosphérique tenant compte de l'angle de visée. Il est cependant intéressant de simuler l'évolution de la réflectance d'une cible en fonction de l'altitude de l'avion et de l'angle de visée. Ceci a été réalisé à l'aide du modèle 6S (Vermote *et al.* 1996). Ce modèle a permis de simuler la réflectance au niveau de l'avion d'une cible lambertienne de réflectance 0,065 dans le vert et 0,05 dans le rouge. Ces valeurs correspondant à la réflectance simulée d'un couvert ligneux de taux de recouvrement 100% et dont les caractéristiques radiométriques sont données dans le Tableau 0.9. L'angle zénithal solaire est égal à 45°. L'environnement de la cible est pris en compte en considérant que sa réflectance est celle du sol nu (Tableau 0.9) et que le rayon de la cible est 3,5 m. Les résultats (Tableau 0.10) sont purement indicatifs. Leur intérêt est d'illustrer et de comparer l'influence de l'atmosphère et de l'angle de visée pour différentes configurations (angle de visée, visibilité atmosphérique). Les résultats permettent de vérifier que plus l'angle de visée sera grand et surtout, plus sa variation relative à l'intérieur de la photographie sera importante, plus la détection du pixel ligneux sera difficile.

Ainsi, le Tableau 0.10 indique clairement que plus le trajet de la lumière dans l'atmosphère sera important, moins la transmittance atmosphérique sera bonne, et plus la distinction d'un pixel ligneux sera difficile. En effet la différence de luminosité entre les canaux vert et rouge caractéristique de la réponse chlorophyllienne a tendance à s'atténuer, voire à devenir négative pour des visibilités faibles et des altitudes de vol importantes. De plus, l'écart entre la réflectance d'un ligneux au centre de la photographie (vu à la verticale) et celle d'un ligneux sur les bords (vu avec un angle maximum) peut atteindre 37% en relatif pour 3 km d'altitude, une visibilité de 5 km et une focale de 28 mm. Cet écart crée une difficulté importante pour distinguer de manière automatique les pixels ligneux. Dans le cas de classifications supervisées, cela impose de prendre des échantillons de pixels ligneux dans toute l'image. Cependant, on constante qu'avec une visibilité de 20 km (Tableau 0.10 (c)) l'évolution de la réflectance en fonction de l'angle de visée et de l'altitude n'est pas excessive et surtout est identique pour les deux canaux. Dans ce cas, la réflectance dans le rouge ne dépasse que de très peu la réflectance dans le vert, contrairement à ce qui se passe pour les autres valeurs de visibilité (Tableau 0.10 (a) et (b)). La sélection des pixels ligneux reste donc envisageable quelle que soit l'altitude et la

focale utilisée. La forte contrainte de la transmittance atmosphérique impose cependant de voler le matin, ce qui entraîne une augmentation des ombres des ligneux sur les photographies. Il en résulte encore un compromis difficile à réaliser.

	canal vert	canal rouge
Réflectance du sol (mesures)	0,255	0,381
Réflectance foliaire (mesures)	0,15	0,13
Transmittance foliaire (mesures)	0,1	0,07
ligneux (simulation DART)	0,065	0,05

Tableau 0.9 : Caractéristiques radiométriques des éléments du paysage.

altitude de l'avion		0,75 km		1,5 km		3 km	
f	α (°)	vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge
	0	0,090	0,102	0,117	0,138	0,147	0,176
200	6,2	0,091	0,102	0,118	0,140	0,149	0,178
135	9,1	0,092	0,103	0,119	0,141	0,151	0,180
80	15,1	0,094	0,106	0,123	0,145	0,157	0186
50	23,4	0,099	0,112	0,132	0,154	0,169	0,199
35	31,7	0,107	0,120	0,144	0,168	0,187	0,216
28	37,7	0,117	0,132	0,161	0,185	0,212	0,242

(a) visibilité 5km

altitude de l'avion		0,75 km		1,5 km		3 km	
f	α (°)	vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge
	0	0,081	0,082	0,099	0,107	0,121	0,134
200	6,2	0,082	0,083	0,100	0,108	0,123	0,136
135	9,1	0,082	0,084	0,101	0,109	0,124	0,137
80	15,1	0,084	0,086	0,104	0,112	0,129	0,142
50	23,4	0,088	0,090	0,111	0,119	0,138	0,151
35	31,7	0,093	0,096	0,120	0,128	0,152	0,164
28	37,7	0,101	0,104	0,133	0,142	0,171	0,284

(b) visibilité 10km

altitude de l'avion		0,75 km		1,5 km		3 km	
f	α (°)	vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge
	0	0,075	0,071	0,088	0,087	0,104	0,106
200	6,2	0,075	0,071	0,089	0,088	0,106	0,108
135	9,1	0,076	0,072	0,090	0,089	0,107	0,109
80	15,1	0,077	0,073	0,092	0,091	0,110	0,112
50	23,4	0,080	0,076	0,096	0,095	0,117	0,119
35	31,7	0,084	0,080	0,103	0,102	0,127	0,128
28	37,7	0,086	0,086	0,113	0,112	0,142	0,142

(c) visibilité 20km

Tableau 0.10 : Réflectance d'un arbuste, entouré de sol nu, au niveau de l'avion. Visibilité atmosphérique: (a) 5km, (b) 10km et (c) 20km.

Altitude de l'avion.

Elle est limitée par les caractéristiques de l'avion (3000 m pour un avion au Burkina Faso), et par les conditions atmosphériques (visibilité).

La longueur de l'image l est $l = \frac{h}{f} \times 36$ avec h l'altitude de vol et f la focale.

On a vu que pour sélectionner de manière automatique les ligneux, compte tenu de la résolution, la longueur d'une image peut être égale au maximum à 4,2 km. Cependant, l'altitude étant limitée à 3km, cette dimension n'est jamais atteinte, même avec un objectif de 28 mm (Tableau 0.11). D'autre part, l'utilisation d'un objectif de 28mm requiert une très bonne visibilité, et rend très difficile la détection des pixels ligneux dans les coins de la photographie.

	h =3km	h =1,5km	h =0,75km
f	l (km)	l (km)	l (km)
200	0,54	0,27	0,13
135	0,80	0,40	0,20
80	1,35	0,67	0,34
50	2,16	1,08	0,54
35	3,08	1,54	0,77
28	3,85	1,93	0,96

Tableau 0.11 : Longueur au sol de la photographie l, selon l'altitude h et la focale f.

- ***Conclusion.***

Le nombre de paramètres susceptibles d'introduire du bruit dans les grandeurs mesurées, voire de les rendre inutilisables est tel qu'il est important d'essayer de les prendre en compte si ce n'est de les maîtriser avant de débuter toute campagne aéroportée. Dans ce but, il est prévu d'utiliser ce protocole de mesure lors de futures missions photographiques aériennes. Des données fiables pourront ainsi être acquises pour la validation du taux de recouvrement ou pour tout autre utilisation directe de cette information. Ce travail a montré la nécessité de préparer avec le plus grand soin les missions de validation afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles.

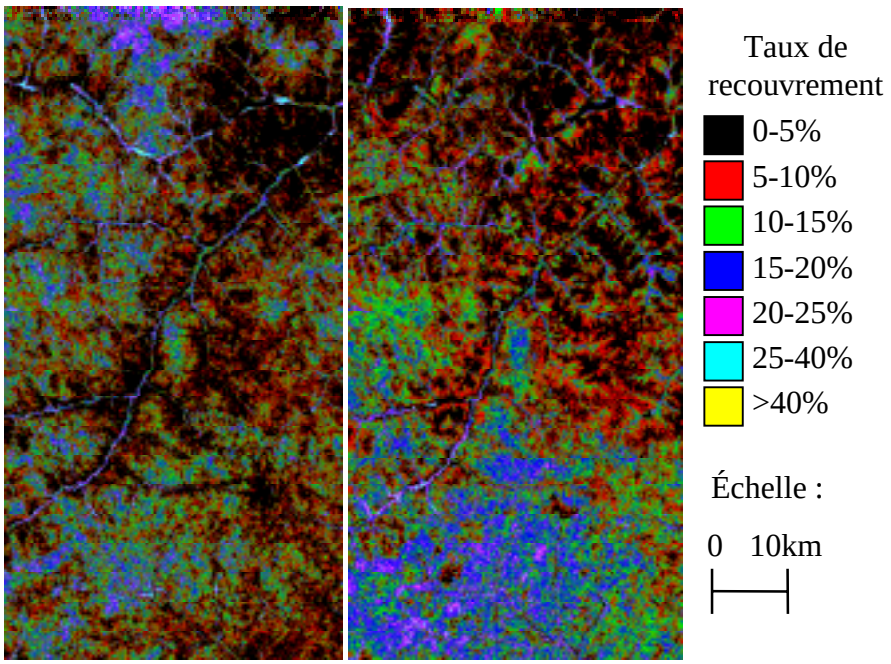
Analyse écologique des résultats.

Dégradation de la couverture ligneuse.

Les images de taux de recouvrement dérivées des images Landsat permettent une analyse écologique de l'évolution de l'écosystème et, en particulier, de la mortalité des ligneux. La première étape purement quantitative consiste à comparer deux dates de la série, d'images Landsat, par exemple 1978 et 1988 (Figure 0.23). Cette comparaison montre une dégradation plus intense dans le nord de la région (en particulier autour de Tougouri, au nord-ouest de l'image) que dans le sud. Le recouvrement semble même avoir augmenté dans le sud de l'image. Ce phénomène peut être dû soit à une augmentation de la strate herbacée depuis 1985 en raison de l'accroissement de la pluviométrie, soit aussi à la date d'acquisition plus tardive dans la saison pour l'image de 1978. La strate herbacée est alors encore plus desséchée.

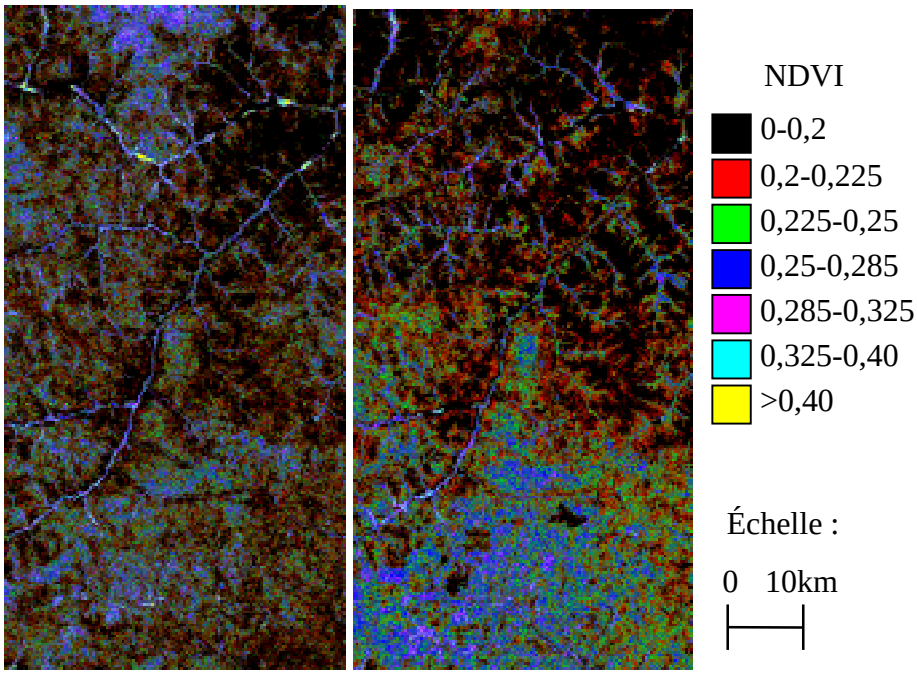
Comparaison entre le taux de recouvrement et le NDVI.

Le NDVI est utilisé depuis longtemps pour interpréter de manière qualitative voire quantitative les images satellitales. Il est donc intéressant de fixer les limites de l'utilisation de ces images par rapport aux résultats d'inversion et donc d'indiquer quel est le supplément d'information apporté par l'inversion. L'utilisation des procédures d'inversion est en effet assez lourde et coûteuse en temps de calcul. L'analyse comparative des images des Figure 0.23 et Figure 0.24 montre que les images de NDVI fournissent une indication de l'évolution générale du taux de recouvrement ligneux équivalente à celle fournie par les images de taux de recouvrement obtenues par inversion. Cependant, le NDVI n'évoluant pas du tout de manière linéaire avec la végétation, le choix des classes pour la représentation peut être plus difficile. En l'absence de relation NDVI taux de recouvrement, l'information fournie par le NDVI est uniquement qualitative. Comment à partir du NDVI réaliser une étude quantitative telle que par exemple le calcul de la mortalité ligneuse, en terme d'extension de la surface de sol nu ? Une solution consiste à relier le NDVI au taux de recouvrement par l'intermédiaire d'une formule empirique. Cette approche nécessite des mesures simultanées de ces deux paramètres sur différents échantillons. Par contre, l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif et d'une procédure d'inversion ne nécessite pas de telles mesures, hormis pour la validation. Seuls des paramètres tels que la réflectance des sols et des feuilles doivent être mesurés ou éventuellement extraits d'une base de donnée. A partir du moment où l'on veut interpréter les images satellitales en terme de paramètres biophysiques, l'inversion d'un modèle de transfert radiatif peut s'avérer plus facile à mettre en œuvre et surtout plus efficace.



(a) (b)

Figure 0.23 : Images de taux de recouvrement du 26/11/1978 (a) et du 16/11/1988 (b). La valeur de LAI utilisée est 3.

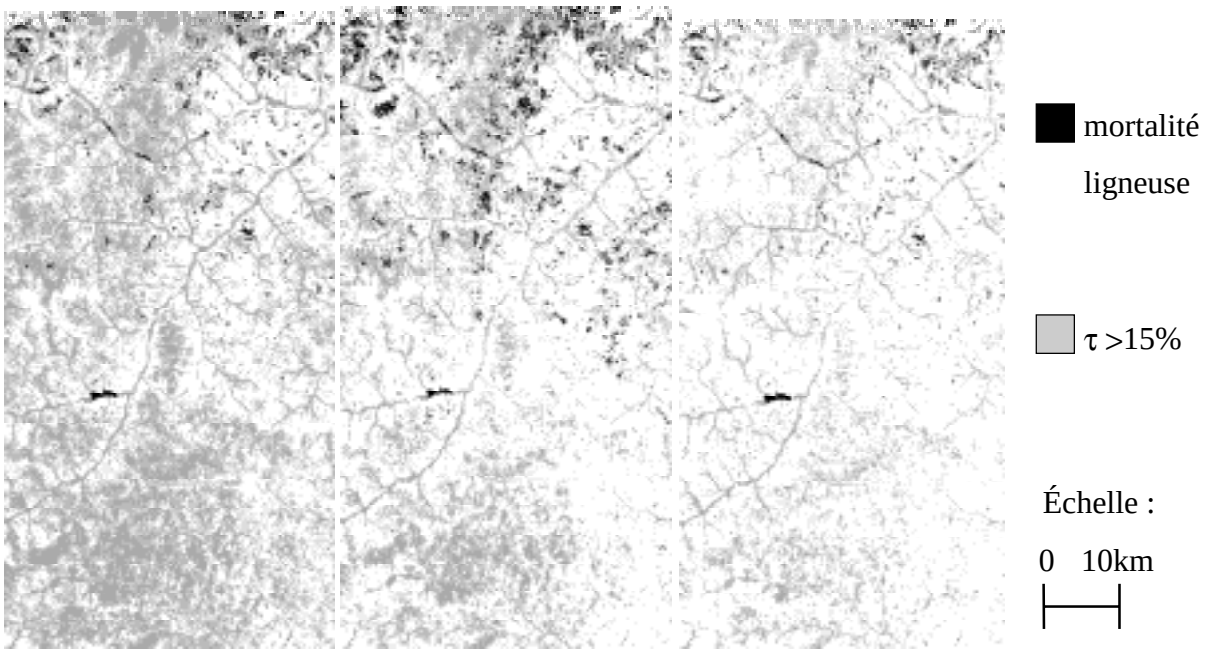


(a) (b)

Figure 0.24 : Images de NDVI du 26/11/1978 (a) et du 16/11/1988 (b).

Calcul de la mortalité ligneuse.

L'objectif de l'étude était de pouvoir fournir des informations quantitatives concernant la dégradation du milieu. Les images de taux de recouvrement associées à une procédure de calcul de la mortalité ont permis de répondre à cet objectif. Cette procédure analyse l'évolution du taux de recouvrement pour chaque pixel. La précision du rééchantillonnage permettant la superposition des images est donc très importante. Cependant, il est très difficile d'obtenir une superposition parfaite. La comparaison pixel à pixel n'est donc valable que si le phénomène observé n'évolue pas de manière brutale entre deux pixels consécutifs. En d'autres termes on ne peut observer le phénomène qu'à l'intérieur de zones homogènes à l'échelle de quelque pixels ; celles-ci sont heureusement courantes sur la zone étudiée. Pour mettre au point la procédure de calcul de la mortalité, il a fallu tenir compte des erreurs commises par la procédure d'inversion, particulièrement en ce qui concerne la modélisation de la strate herbacée. Une règle de décision, permettant de détecter les pixels où il y a effectivement eu mortalité des ligneux a donc été mise au point. Elle repose sur l'hypothèse selon laquelle un taux de recouvrement inférieur à 1,5% correspond à un sol nu et un taux supérieur à 5% correspond à une présence significative de ligneux. Ce seuil de 5% peut cependant correspondre dans certains cas à la présence d'herbacées seules, ce qui fausse le résultat. Cette source d'erreur est minimisée par le fait que les herbacées sont le plus souvent associées à la présence d'arbustes. La procédure de sélection tient compte de la qualité des différentes images en autorisant certaines erreurs. Elle calcule pour chaque pixel la moyenne $\tau_{m\text{-}sup}$ des deux plus fortes valeurs de taux de recouvrement avant 1984, ainsi que la valeur la plus faible entre 1988 et 1990 $\tau_{inf} = \min(\tau_{1988},\tau_{1990})$ et le gradient entre ces deux dates $\Delta\tau = \tau_{1990}\text{-}\tau_{1988}$. Les pixels retenus respectent les critères suivants : $\tau_{m\text{-}sup} > 5\%$, $\tau_{inf} < 1{,}5\%$ et $\Delta\tau < 1$. La dernière condition permet de ne pas sélectionner les pixels pour lesquels le taux de recouvrement augmente entre 1988 et 1990. Ceci est le cas des pixels essentiellement recouverts d'herbacées. Le résultat de cette procédure (Figure 0.25) est une image localisant les pixels où la végétation ligneuse a disparu entre 1972 et 1990. Cette approche a été utilisée pour trois valeurs de LAI par arbre (2, 3 et 4). Si l'on s'en tient à la connaissance du phénomène de mortalité et aux observations sur le terrain, c'est la valeur LAI=3 qui semble donner les résultats les plus probables. Sur les images, nous pouvons voir différentes zones fortement touchées : la région de Tougouri au nord ouest, ainsi qu'un lac artificiel au milieu de l'image qui n'existait pas avant 1985.



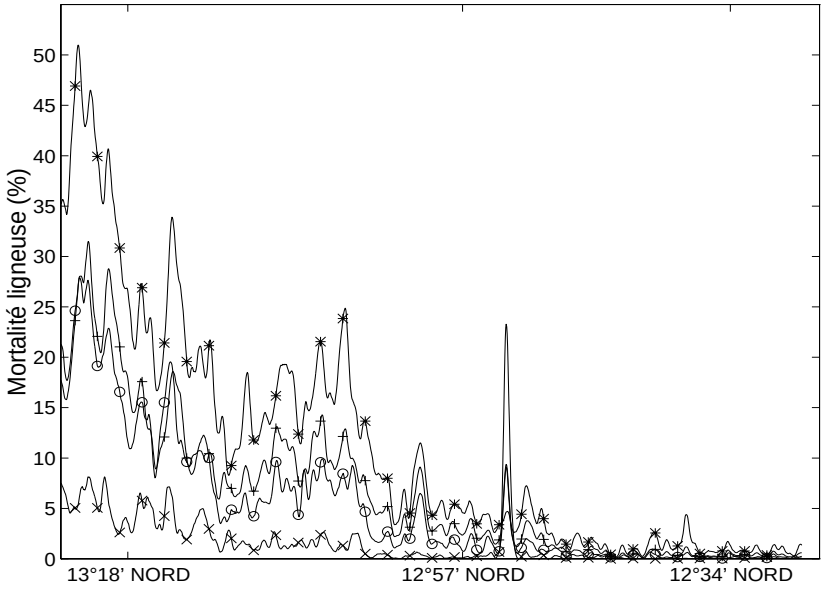
(a) (b) (c)

Figure 0.25 : Localisation de la mortalité ligneuse entre 1978 et 1990. Calcul effectué par inversion appliquée aux images Landsat MSS en utilisant un LAI de 2 (a), 3 (b) et 4 (c).

On peut de plus présenter l'évolution de la mortalité ligneuse suivant un transect nord sud (Figure 0.26). Il apparaît que la mortalité peut toucher jusqu'à 50% des pixels de la classe la plus faiblement peuplée (5-10%) au nord de l'image, et jusqu'à 30% de la totalité des surfaces peuplées par les ligneux, dans cette même zone.

Il faut cependant toujours garder à l'esprit les différentes sources d'erreur possibles avant d'interpréter ces résultats :

- La validation d'une image de taux de recouvrement a indiqué une précision meilleure que 5% en absolu, excepté dans les bas fonds.
- La procédure de calcul de la mortalité sélectionne uniquement les pixels où la mortalité a été totale. Ainsi les pixels passant par exemple de 20% à 10% de taux de recouvrement ne sont pas sélectionnés.
- La comparaison pixel à pixel est elle adaptée ? La réponse à cette question est difficile car elle dépend à la fois de la qualité des corrections géométriques effectuées et de l'hétérogénéité spatiale du milieu.



Malgré ces remarques, le traitement des images par la procédure d'inversion suivi du calcul de la mortalité a non seulement permis de donner des résultats chiffrés mais aussi de localiser les sites de mortalité.

Figure 0.26 : Transect nord sud de la mortalité ligneuse entre 1972 et 1990 pour les quatre classes : 5-10% (*), 10-20% (o), 20-100% (×) et pour l'ensemble 5-100% (+).

Le point de vue de l'écologiste.

Cette étude ayant été réalisée à des fins écologiques, il est intéressant d'indiquer l'opinion des naturalistes concernant les résultats obtenus et la méthode utilisée. Certaines conclusions sont retranscrites dans le paragraphe qui suit.

« La couverture ligneuse a rarement pu être obtenue avec cette précision sur une zone aussi étendue et pour une période aussi longue (Fournier, 1987 ; Le Houerou, 1989 ; Achard *et al.*, 1989b). De plus, l'erreur absolue entre le taux de recouvrement calculé à partir des images satellitales et celui calculé à partir des photographies aériennes ne dépasse pas 5% excepté dans les bas-fonds, la strate herbacée étant une des sources d'erreur les plus importantes. Cette surestimation affecte principalement les zones les moins couvertes (5-10%), la précision étant meilleure pour les autres classes. En fait, la couverture ligneuse excède rarement 40% sur le site test. Les zones les plus recouvertes représentent la ressource essentielle de bois et comportent la plus grande biodiversité. Elles ont aussi le plus grand potentiel économique et écologique. La méthode développée pour cette étude apporte donc des données nouvelles et intéressantes.

Nouvelles parce que les écologistes avaient jusqu'à présent peu d'outils pour reconstruire l'histoire des écosystèmes (Menaut, 1983 ; Achard, 1989a). Or les données de télédétection associées avec des méthodes d'analyse telles que celles développées ici peuvent apporter une solution à ce problème. Cela nécessite cependant la disponibilité de séries temporelles d'images satellitales ainsi que la mesure sur le terrain des paramètres nécessaires à la modélisation. Actuellement, de nombreux satellites tels que SPOT, Landsat, NOAA AVHRR, comportent des capteurs pouvant fournir ces séries temporelles. Concernant les campagnes de

mesures, de plus en plus d'efforts sont faits pour obtenir des informations précises sur le terrain. Cela peut nous permettre de penser que dans le futur, la modélisation sera de plus en plus utilisée dans de nombreuses applications, y compris le traitement des problèmes écologiques de fond.

Utiles, parce que la préoccupation principale des pays (du sud ou du nord) est de gérer leur espace et leur environnement de manière efficace, et cela à des intervalles de temps de plus en plus courts. Par exemple, les pays tropicaux doivent faire face à des problèmes urgents d'érosion des sols et à des besoins de plus en plus importants en terres agricoles. En même temps, ils doivent protéger les écosystèmes forestiers productifs. Ceci est vrai pour les pays d'Afrique de l'ouest comme le Burkina Faso, mais aussi pour ceux d'Afrique du sud et ceux de la zone intertropicale en général. Dans ce contexte, la télédétection spatiale ne peut pas résoudre directement le problème, mais elle peut aider à tirer la sonnette d'alarme. »

Conclusion.

Cette étude était le premier essai d'inversion du modèle DART. Elle a permis d'apporter un élément de réponse à la question de l'inversibilité du modèle DART. Grâce à cette étude, nous avons donc pu montrer que le modèle DART peut être utilisé dans un processus d'inversion d'images satellitales. Il a été employé ici pour calculer les paramètres d'un modèle de réflectance analytique. Une méthode d'inversion plus générale a été réalisée ultérieurement (*cf.* chapitre II). Il est cependant important d'insister sur le fait que cette étude sur le Burkina Faso a été conduite au delà de l'aspect purement mathématique de l'inversibilité. En effet, elle a permis l'analyse d'un problème écologique concret de manière plus quantitative et plus fiable que l'utilisation d'un outil classique tel que le NDVI. Ainsi, l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif et de son inversion a fourni directement des paramètres biophysiques utilisables par les écologistes. La procédure utilisée est relativement simple à mettre en œuvre et nécessite peu de données annexes. L'obtention des valeurs de réflectance du sol et des feuilles a nécessité peu de travail comparé par exemple à une campagne de mesures du taux de recouvrement et du NDVI. De plus ces valeurs pourront être réutilisées par la suite. En dehors du point de vue de la logique, une preuve de l'utilité et de l'efficacité de cette approche est l'accueil enthousiaste par les naturalistes du LET instigateurs, au niveau écologique, de ce projet face aux résultats et à l'utilisation qu'ils ont pu en faire. Ce type d'étude a une nouvelle fois mis en évidence l'intérêt d'une collaboration entre écologistes et physiciens, les deux communautés ne pouvant que profiter de la connaissance et du savoir faire de chacune.

III EVALUATION DE LA MORTALITÉ LIGNEUSE AU BURKINA FASO À PARTIR D'IMAGES LANDSAT MSS 5

III.1 Introduction. 5

III.1.1 Les milieux tropicaux secs et leur surveillance par télédétection. 5

III.1.2 Le site d'étude. 6

III.1.3 Les deux objectifs de l'étude. 8

III.2 Un modèle simplifié de la réflectance du paysage et son inversion. 8

III.2.1 Configurations de visée. 10

III.2.2 La réflectance des différents éléments du paysage. 10

III.2.3 Mise en place du modèle de réflectance du paysage. 16

III.2.4 Inversion du modèle de réflectance. 18

III.2.5 Test de robustesse de l'inversion. 19

III.3 Résultats de l'inversion et validation. 19

III.3.1 Validation des résultats à partir de photographies aériennes noir et blanc 20

III.3.2 Mise au point d'un protocole de validation systématique. 23

III.4 Analyse écologique des résultats. 33

III.4.1 Dégradation de la couverture ligneuse. 33

III.4.2 Comparaison entre le taux de recouvrement et le NDVI. 33

III.4.3 Calcul de la mortalité ligneuse. 35

III.4.4 Le point de vue de l'écologiste 37

III.5 Conclusion 38

INVERSION D'IMAGES SPOT SUR LA FORET DE FONTAINEBLEAU

Introduction.

Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'apport des méthodes d'inversion pour l'extraction du LAI à partir de données satellitales. Pour cela, onze images SPOT de la forêt de Fontainebleau, acquises entre 1989 et 1997 (Tableau 0.1), ont été corrigées des effets atmosphériques, géoréférencées et utilisées en entrée du programme d'inversion présenté dans le chapitre II. Ce travail a permis à la fois d'effectuer la validation du programme d'inversion et de répondre à une demande des écologistes du LEV (Laboratoire d'Écophysiologie Végétale, Orsay), concernant la possibilité d'obtenir des cartes de LAI sur la forêt de Fontainebleau. Ces cartes peuvent en effet être utilisées en entrée de modèles de fonctionnement de la forêt, comme le modèle CASTANEA.

La forêt de Fontainebleau fait l'objet depuis plusieurs années de multiples campagnes de mesures s'intégrant en particulier dans une composante du projet EMAC (European Multisensors Airborne Campaign). Nous disposions ainsi de nombreuses données multidates de LAI (Dufrêne *et al.*, 1997) permettant une comparaison précise entre les sorties de la procédure d'inversion et la mesure terrain. De plus, nous avons comparé les résultats de l'inversion du modèle DART à ceux obtenus de manière plus classique à partir de relations empiriques basées sur le NDVI ou le SR (simple rapport). Une comparaison avec l'inversion du modèle SAIL a également été réalisée. Le RMSE calculé entre le LAI mesuré et le LAI obtenu par inversion varie entre 1 et 1,5 en fonction des années. Les méthodes empiriques utilisant des images corrigées des effets atmosphériques donnent des résultats comparables. Cependant, l'obtention des relations empiriques nécessite un jeu de données important contrairement à l'utilisation de l'inversion.

Date	Heure		Gain $(W/m^2/sr/\mu m)^{-1}$			θ_s	φ_s	θ_v	φ_v
	(UTM)		XS1	XS2	XS3				
09/09/89	10h53'17''	HRV2	1,01402	1,09250	0,95722	42,2	161,0	06,7	282,4
11/10/90	11h09'20''	HRV2	1,19104	1,19661	1,27554	55,6	172,0	13,8	104,9
30/08/91	10h57'53''	HRV1	1,03894	1,15744	1,28655	40,5	160,2	01,7	283,0
25/08/92	11h13'55''	HRV2	0,93923	1,04047	0,93523	38,4	165,4	24,1	106,4
28/06/93	10h55'45''	HRV2	0,89744	0,98845	0,86759	27,4	151,5	01,4	283,1
10/07/94	11h00'40''	HRV2	1,75353	1,35211	1,53036	28,0	153,5	04,3	103,7
10/07/95	10h41'07''	HRV2	1,70895	1,34464	1,52594	29,7	144,9	21,7	280,4
16/04/96	10h36'58''	HRV1	1,46869	1,32131	1,52890	41,1	153,0	26,2	279,7
17/07/96	11h07'00''	HRV1	1,46869	1,32131	1,52890	28,7	156,6	14,8	105,0
05/09/96	11h02'53''	HRV2	1,56065	1,54998	1,43456	42,7	163,9	10,4	104,4
13/08/97	10h53'39''	HRV1	1,37341	1,04465	1,38629	35,5	154,6	3,9	103,8

Tableau 0.1 : Principales caractéristiques des images SPOT acquises au dessus de la forêt de Fontainebleau : date, heure, détecteur, coefficient d'étalonnage, angle zénithal et azimutal solaire, angle zénithal et azimutal d'observation.

Le site d'étude.

La forêt de Fontainebleau est située au sud de Paris. Elle couvre une superficie de 17000 ha.



Figure 0.1 : Localisation de la forêt de Fontainebleau.

(**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Le domaine se divise en différentes parcelles caractérisées par une, ou plusieurs espèces dominantes, une topographie plane ou accidentée et différents stades de développement de la végétation, c'est-à-dire différentes architectures du couvert. On trouve ainsi des parcelles de pins, de chênes, de hêtres, de charmes, et de bouleaux, plusieurs espèces pouvant cohabiter. Le stade de développement peut aller du fourré de quelque années ayant une hauteur inférieure à 3 m, à la futaie de plusieurs dizaines d'années, avec une hauteur supérieure à 15 m.

Les données disponibles.

L'observation régulière de la forêt de Fontainebleau par le satellite SPOT nous a permis d'acquérir 11 images multispectrales de 1989 à 1997 (Tableau 0.1). Leur résolution spatiale est de 20 m dans les trois canaux XS1 (500 nm à 590 nm), XS2 (610 nm à 680 nm) et XS3 (790 nm à 890 nm).

L'ONF (Office National des Forêts), organisme gérant la forêt de Fontainebleau, a réalisé et fourni un parcellaire du site, sous forme numérique. Celui-ci est disponible au format Arc/Info. Une table d'attributs comportant des renseignements du type espèce, âge, ... , est liée à ce fichier. Ces informations ont été intégrées dans notre SIG (Système d'Information Géographique) avec toutes les autres données disponibles.

Par ailleurs, la forêt de Fontainebleau a constitué le site forestier du projet EMAC (European Multi-sensor Airborne Campaign) de l'Agence Spatiale Européenne (Dufrêne *et al.*, 1997). Dans ce cadre, 38 parcelles de feuillus et 13 de pins ont fait l'objet de mesures systématiques par le LEV. Ainsi, des valeurs de LAI (Dufrêne *et al.*, 1997), mesurées à l'aide d'un LICOR LAI 2000, sont disponibles pour les années 1994, 1995, 1996 et 1997. Les données de LAI utilisées sont brutes. Aucune correction n'a été apportée dans le cas des pins.

Définition, mesure et utilisation du LAI.

La définition du LAI est loin d'être universelle. Dans le cas des feuillus la notion de LAI se conçoit relativement bien. Les éléments foliaires peuvent être assimilés à des surfaces planes ou non. Le LAI représente alors la somme de toutes ces surfaces élémentaires rapportée à la surface au sol. Dans le cas des pins, la définition se complique, les aiguilles ne pouvant plus être assimilées à des surfaces mais à des volumes. Chen *et al.* (1996) suggèrent de définir alors le LAI comme la surface totale réelle des aiguilles divisée par deux et rapportée à la surface au sol. Cette définition peut également être appliquée dans le cas des feuillus, en considérant la surface des deux faces de la feuille. Au delà de la définition, la mesure pose un autre problème.

Des appareils comme le LICOR LAI 2000 (Li-Cor Inc., Lincoln, Neb, USA) fournissent un LAI souvent qualifié d'effectif, par référence au transfert radiatif dans le couvert. Il est obtenu en mesurant le flux traversant le couvert suivant différentes directions et en supposant que le couvert est un milieux turbide homogène. La surface alors mesurée tient compte de tous les éléments, feuilles, branches, ... De plus, l'hypothèse d'un milieu homogène est seulement acceptable pour un couvert de feuillus de taux de recouvrement 100%. Ainsi, dans le cas des

pins, la répartition même des aiguilles sur les branches n'est pas homogène. Des agrégations de formes différentes, boules, cylindres, apparaissent. Différentes formules permettent de convertir la valeur de LAI mesuré en LAI réel (Chen *et al.*, 1996). De plus, les couverts de pins sont en général assez ouverts ; ce qui crée une hétérogénéité à l'échelle du houppier. Il est donc très difficile d'obtenir une idée de la précision d'une mesure indirecte de LAI, telle que celle effectuée avec un LICOR LAI 2000. D'autant plus que la mesure directe, à partir de la surface réelle des feuilles, est dans la plupart des cas irréalisable.

Un autre problème concernant le LAI doit être souligné : l'utilisation que nous comptons en faire. Ainsi, il est souvent utilisé comme paramètre des modèles de fonctionnement. La surface foliaire intervient alors dans les processus de photosynthèse, d'évapotranspiration, de respiration, ... il ne s'agit pas tout à fait de la même surface. Ainsi, les stomates ne sont généralement pas réparties de la même manière sur les deux faces foliaires. De plus, la surface foliaire efficace du point de vue du fonctionnement varie dans le temps. Ceci est en particulier le cas pour les échanges de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. D'autre part, dans le cas des pins, le phénomène d'agrégation foliaire permet-il aux aiguilles d'être toutes éclairées en permanence ? Le LAI est également utilisé dans les modèles de transfert radiatif, les surfaces foliaires interviennent alors en temps qu'éléments diffuseur du rayonnement. Quelle est dans ce cas particulier la signification du LAI ? Dépend-elle du modèle utilisé ? Quel est le lien entre le LAI utilisé dans les différents modèles et la réalité ?

Toutes ces questions importantes n'ont malheureusement pas à l'heure actuelle de réponse précise. Dans cette étude, nous nous sommes contentés de comparer le LAI mesuré avec le LICOR LAI 2000 aux valeurs obtenues par inversion, pour le cas des feuillus. On peut en effet espérer que dans ces conditions, le LAI mesuré correspond bien au LAI utilisé dans le modèle DART.

Les objectifs de l'étude.

L'objectif de cette étude était d'évaluer la possibilité d'obtenir de manière rigoureuse et systématique le LAI à partir de données satellitales de type SPOT. Pour cela nous avons développé une méthode comprenant 4 étapes :

- La correction des effets atmosphériques pour obtenir la réflectance au niveau du sol.
- La détermination de la valeur des paramètres fixes de l'inversion.
- La création de la table de simulations, nécessaire à l'inversion.
- L'inversion.

Traitement et inversion des images SPOT.

Les 4 étapes importantes de la méthode sont décrites dans les paragraphes qui suivent. Différents problèmes sont apparus dans chacune de ces étapes mettant en évidence la grande difficulté d'obtenir de manière opérationnelle un paramètre tel que le LAI.

Extraction des sous-images et géoréférencement.

Les images brutes ont été lues directement avec le SIG ILWIS. Toutes les opérations suivantes, hormis l'inversion et la correction atmosphérique par le modèle 6S ont été réalisées avec ce logiciel. Les images SPOT (≈3000×3000 pixels) couvrent une zone plus importante que la forêt de Fontainebleau. Nous avons donc extrait manuellement des imagettes (1000×1000 pixels) couvrant la majeur partie de la forêt et englobant en particulier le parcellaire ONF et donc les 51 parcelles échantillonnées sur le terrain (Figure 0.2). Ces imagettes ont été géoréférencées par prise de points d'amer par rapport au fichier vecteur du parcellaire de l'ONF. Les coordonnées sont données dans la projection cartographique Lambert 1 modifiée IGN. La totalité des données sont intégrées dans le SIG. Ce type de logiciel est indispensable pour pouvoir gérer de manière simple toutes les informations spatiales. Il permet par exemple d'extraire pour un point donné toutes les informations disponibles sur les différentes cartes, ou images, géoréférencées, par l'intermédiaire de ces coordonnées. Le SIG est un outil incontournable pour ce genre d'étude.

Qualité radiométriques des images SPOT.

L'étalonnage entre détecteurs du capteur SPOT HRV est effectué à l'aide de cibles à forte réflectance (neige et glace du Groenland). La linéarité des détecteurs n'étant pas garantie en dessous d'un certain seuil de luminance, il apparaît sur certaines images des différences de l'ordre de 2 en compte numérique entre les différentes barrettes de détecteurs (Figure 0.3). C'est le cas en particulier pour le canal XS2 des images du 13/08/97, du 28/06/93, du 11/10/90 et du 09/09/89. Cette différence de 2 est faible si on la considère par rapport à la moyenne de l'image brute. Cependant, après correction des effets atmosphériques (*cf.* IV.2.3), on obtient une différence de 0,67% en absolu sur les réflectances en bas de l'atmosphère à comparer à la valeur de la réflectance de la végétation dans le rouge, voisine de 2%.

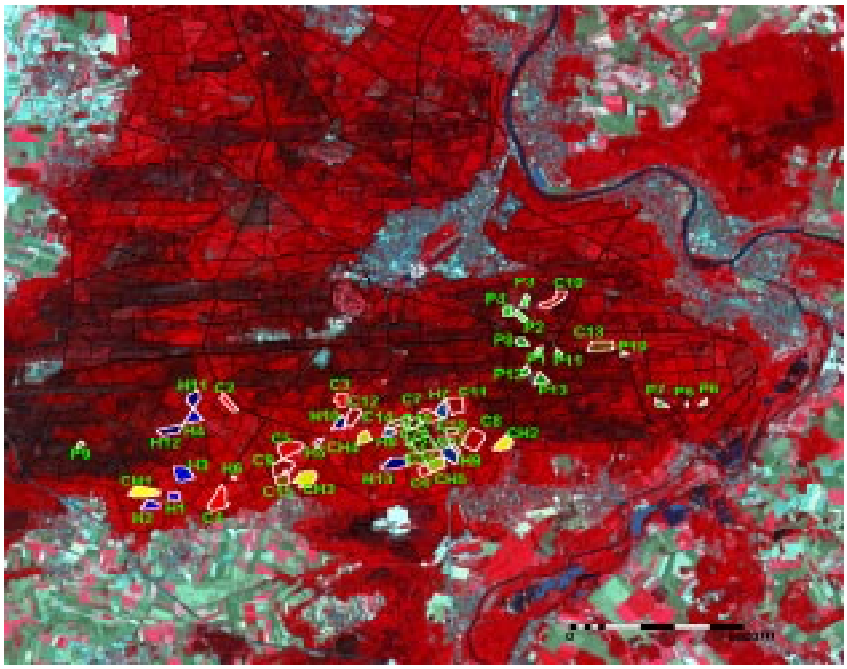


Figure 0.2 : Composition colorée de l'image SPOT du 10/07/94 avec en surimpression le parcellaire ONF et les 51 parcelles échantillonnées lors de la campagne EMAC.

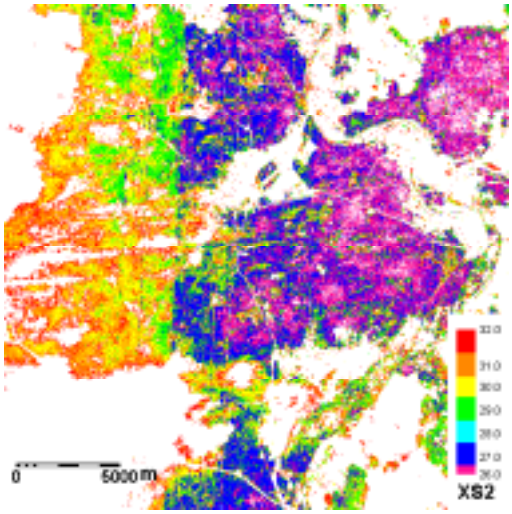


Figure 0.3 : Image SPOT du 13/08/97 dans le canal XS2. Un défaut d'étalonnage entre détecteurs est perceptible. Il correspond à une différence de l'ordre de 2 entre les comptes numériques de deux barrettes successives.

Le défaut d'étalonnage est, de plus, amplifié par les indices tels que le NDVI et par l'utilisation de relations empiriques donnant, par exemple, le LAI en fonction du NDVI (relations de type puissance ou exponentielle). L'erreur sur le calcul du LAI peut alors être supérieure à 1 (Tableau 0.2). Cette erreur peut paraître faible dans l'absolu, sachant qu'il existe bien d'autres sources d'erreur, mais son inconvénient majeur tient au fait qu'elle n'affecte l'image ni de manière homogène ni de manière purement aléatoire. Sa correction est donc très difficile.

L'utilisation du canal vert pour calculer le NDVI et le LAI ne diminue pas la sensibilité du résultat aux erreurs de réflectance, compte tenu des relations LAI(NDVI) utilisées. Le Tableau

0.2 présente les valeurs du LAI obtenues à partir du NDVI calculé avec les canaux vert et rouge. Les réflectances dans les canaux vert et rouge varient par pas de 0,33%. Pour un LAI de 8,5 une augmentation de la réflectance de 0,33% conduit à un LAI de 7,5 si on utilise le canal rouge et 7,29 si on utilise le canal vert. Cependant, les erreurs d'étalonnage entre détecteurs se sont avérées plus faibles pour le canal XS1 que pour le canal XS2. Dans ce cas il est plus avantageux d'utiliser le NDVI calculé avec ce canal.

Les images présentant ce défaut ont été retournées à la société SPOT Image qui distribue les produits SPOT. Malheureusement, dans ce cas précis, leurs algorithmes de correction se sont avérés inefficaces pour résoudre ce problème.

ρ_{PIR}	ρ_{rouge}	ρ_{vert}	NDVI	NDVI XS1	LAI=f(NDVI)	LAI=f(NDVI XS1)	LAI inversion
0,55	0,010	0,029	0,964	0,898	8,58	8,58	8,9
0,55	0,013	0,033	0,953	0,887	7,50	7,29	9,0
0,55	0,017	0,036	0,941	0,877	6,55	6,19	9,1
0,55	0,020	0,039	0,930	0,866	5,72	5,25	8,9
0,55	0,023	0,043	0,919	0,856	5,00	4,46	8,9
0,55	0,027	0,046	0,908	0,845	4,37	3,78	8,8
0,55	0,030	0,049	0,897	0,835	3,82	3,21	8,9

Tableau 0.2 : Influence de l'erreur d'étalonnage entre détecteurs sur le calcul du NDVI et du LAI. Le LAI est obtenu avec les relations : $LAI=12,864\times NDVI^{11,238}$ pour le NDVI calculé avec le canal rouge et $LAI=36,355\times NDVI^{13,449}$ pour le NDVI calculé avec le canal vert. Il est intéressant de constater que la méthode d'inversion est très peu sensible au bruit instrumental, dans ce cas particulier.

Normalisation des réflectances SPOT.

Les comptes numériques d'une image SPOT peuvent directement être reliés à la luminance au sommet de l'atmosphère grâce aux coefficients d'étalonnage. Cette valeur de luminance va dépendre non seulement des caractéristiques de la cible (LAI, taux de recouvrement, ..., dans le cas de la végétation), mais également des caractéristiques de l'atmosphère et des conditions d'éclairement et de visée. Le but de la correction atmosphérique est d'obtenir une image de réflectance au niveau du sol, ne dépendant plus des caractéristiques de l'atmosphère. Cette opération s'avère très délicate pour obtenir une précision satisfaisante. De plus, dans le cas d'une série d'images, il est plus important de minimiser l'erreur relative entre les différentes images que l'erreur absolue.

- ***Correction des images de 1994 à 1996 par inversion du modèle 6S.***

  Pour réaliser la correction atmosphérique sur la série d'images SPOT, nous avons tout d'abord appliqué une procédure, utilisant des mesures de caractéristiques atmosphériques, à 4 images disponibles dès le début de cette étude (une image en 1994, une image en 1995, et deux images en 1996). L'image du 16/04/96 n'a malheureusement pas pu être utilisée à cause d'un taux de couverture nuageuse trop important. La station météorologique de Trappes a fourni les profils atmosphériques en pression, température et vapeur d'eau, mesurés par radiosondage, aux dates d'acquisition des images et à 12h UTC. La visibilité a également été mesurée (Tableau 0.3). Le profil d'ozone n'étant pas disponible, nous avons utilisé un profil standard du modèle 6S (Vermote *et al.*, 1996). Les images ont été corrigées en utilisant la procédure itérative d'inversion du modèle 6S mise au point par Zagolski et Gastellu-Etchegorry (1995). La cohérence des résultats sur ces quatre images a été vérifiée à l'aide d'un test simple : la réflectance minimale de la végétation dans le rouge doit être proche de 3%. Les images du 10/07/1994, du 14/07/1996 et du 05/09/1996 répondent à ce critère. Pour l'image du 10/07/95, la réflectance de la végétation dans le rouge est proche de 6%. Cette seule erreur, permet de conclure que la correction atmosphérique à l'aide des profils ne suffit pas. Il est donc nécessaire de normaliser toutes les images par rapport à une image de référence. Pour cela, nous avons choisi celle de 1994.

	Visibilité		
	10h UTC	11h UTC	12h UTC
Date			
10/07/94			10km
10/07/95	15km	15km	
16/04/96	20km	20km	
14/07/96		30km	30km
05/09/96		12km	12km

Tableau 0.3 : Visibilité mesurée à la station de Trappes.

- ***Normalisation des images pré-corrigées 6S par rapport à l'image de 1994.***

  La normalisation des images s'effectue à l'aide d'une simple loi linéaire dans chaque canal. Pour fixer les coefficients de cette loi, il est donc nécessaire de disposer de deux valeurs de référence distinctes pour chaque canal. Ces références doivent être fixes d'une image à l'autre, ou alors la variation en fonction des conditions d'éclairement et de visée doit être connue. L'idéal pour ce type de travail est de trouver des cibles de référence suffisamment

étendues, et stables dans le temps. Pour la référence inférieure dans le proche infrarouge, nous avons ainsi utilisé les surfaces d'eau. Pour les références supérieures, l'utilisation d'une gravière de très forte réflectance, située au sud de la forêt (Figure 0.2) aurait été très intéressante, si les comptes numériques associés n'étaient pas saturés pour les images des années 1994, 1995, 1996 et 1997.

Pour les canaux rouge et vert, les valeurs de référence supérieures ont été calculées à l'aide d'un parking situé au bord de l'autoroute au sud de l'image (Figure 0.2). Cette surface a été considérée comme lambertienne : les réflectances de référence correspondantes sont donc supposées ne pas varier en fonction des conditions de visée et d'éclairement. La précision sur les fortes valeurs de réflectance étant plus importante dans le PIR que dans le visible, pour l'étude de la végétation, nous avons préféré utiliser la végétation elle même comme référence dans le PIR. La réflectance de référence supérieure dans le PIR a donc été choisie comme la valeur correspondant au seuil de 98% sur l'histogramme cumulé du canal PIR, calculé sur l'ensemble des 51 parcelles de test. La réflectance de référence inférieure des canaux vert et rouge a été calculée comme étant la réflectance moyenne des pixels des 51 parcelles, dont la réflectance dans le PIR est supérieure au seuil précédent.

Une procédure programmée avec le SIG ILWIS permet d'extraire automatiquement ces 6 valeurs de références (2 par canal) sur les images SPOT. Elle a été appliquée aux images pré-corrigées avec le modèle 6S, pour obtenir les valeurs de réflectance de référence avant normalisation (Tableau 0.4).

	Réflectance inférieure de référence			Réflectance supérieure de référence		
	vert (1)	rouge (1)	PIR (2)	vert (3)	rouge (3)	PIR (1)
10/07/94	3,4%	2,1%	4,8%	25,3%	31%	56,7%
10/07/95	8,9%	6,3%	12%	21,7%	25,3%	53%
14/07/96	3,2%	2,3%	7,3%	24,7%	28,7%	48,7%
05/09/96	2,6%	2,6%	5,7%	20,3%	23,7%	39,7%

Tableau 0.4 : Réflectances de référence des images pré-corrigées avec 6S, avant normalisation. Réflectances moyennes des pixels de végétation homogène et dense (1), de surfaces d'eau (2) et d'un parking (3). On suppose que (2) et (3) sont lambertiens.

La réflectance de la végétation variant avec les conditions d'éclairement et d'observation, on ne peut pas normaliser les images directement par rapport aux valeurs de référence de l'image de 1994. Pour simuler les variations et obtenir des valeurs de référence utilisables pour chaque date, nous avons utilisé des simulations DART. Nous avons supposé que le

maximum de réflectance dans le canal PIR est obtenu pour des couverts denses de taux de recouvrement 100%. Cette hypothèse a été validée sur le terrain. En effet, les pixels présentant le maximum de réflectance dans le PIR se sont avérés être dans les parcelles H5, H10 et H13, qui correspondent à des milieux denses de jeunes gaulis, dont le LAI moyen est supérieur à 8. Nous avons ajusté les valeurs de réflectance et transmittance foliaires d'un jeu de simulations, afin d'obtenir des valeurs de réflectances simulées proches des valeurs de références de l'image de 1994. Il ne s'agit pas d'une inversion, mais d'un simple ajustement réalisé avec une précision absolue de 1% sur la valeur de $\omega_f=\tau_f+\rho_f$. Les simulations ont été réalisées avec un taux de recouvrement de 100% et un LAI de 9,3 (u_f=0,8), de l'ordre du LAI maximum escompté. Nous avons considéré $\tau_f=\rho_f$. Les valeurs de ω_f obtenues par ajustement sont 20%, 12% et 96% pour les canaux vert, rouge et PIR. Ces valeurs ont été utilisées pour simuler la réflectance de parcelles avec un LAI de 9,3 et un taux de recouvrement de 100% pour toutes les conditions d'éclairement et de visée des images SPOT. On peut ainsi obtenir les réflectances de référence après normalisation pour chaque image (Tableau 0.5), composées d'une part des valeurs de réflectance simulées avec le modèle DART, d'autres part des valeurs de réflectance de référence, des surfaces lambertiennes (parking et eau) de l'image de 1994. On remarque que compte tenu de la précision de l'ajustement des valeurs de ω_f , les valeurs de référence simulées pour 1994 diffèrent légèrement des valeurs de l'image de 1994. La normalisation sera donc également appliquée à cette image.

	Réflectance inférieure de référence			Réflectance supérieure de référence		
Date	vert (1)	rouge (1)	PIR (2)	vert (3)	rouge (3)	PIR (1)
10/07/94	3,6%	2,0%	4,8%	25,3%	31%	55,8%
10/07/95	3,4%	1,9%	4,8%	25,3%	31%	54,4%
16/04/96	3,3%	1,9%	4,8%	25,3%	31%	54,3%
17/07/96	3,6%	2,1%	4,8%	25,3%	31%	56,3%
05/09/96	3,5%	2,0%	4,8%	25,3%	31%	56,3%

Tableau 0.5 : Réflectances de référence des différentes images après normalisation. Réflectances des parcelles homogènes denses (1) simulées avec le modèle DART. Réflectance de surfaces d'eau (2) et d'un parking (3) supposés lambertiens, de l'image pré-corrigée 6S du 10/07/94.

A ce stade, la normalisation des images s'effectue de manière très simple. Il suffit d'appliquer une loi linéaire $\rho_{égalisée}=a\times\rho_{corrigée}+b$ pour chaque canal, permettant de passer

des valeurs de référence avant normalisation (Tableau 0.4) aux valeurs après normalisation (Tableau 0.5).

- ***Normalisation directe des images brutes par rapport à l'image de 1994.***

  Étant donné que la correction 6S ne suffit pas, nous avons testé la possibilité d'éviter cette étape pour la correction des images restantes (1989, 1990, 1991, 1993 et 1997). La normalisation linéaire n'est plus effectuée sur des images en réflectance pré-corrigée 6S, mais directement sur les images brutes en compte numérique. Pour cela, nous avons calculé de la même façon que précédemment des valeurs de compte numérique de référence avant normalisation (Tableau 0.6) et des valeurs de réflectance de référence après normalisation (Tableau 0.7). La normalisation des images s'effectue en appliquant une simple loi linéaire $\rho_{égalisée}=a\times CN+b$.

	Valeur inférieur de référence			Valeur supérieure de référence		
	vert (1)	rouge (1)	PIR (2)	vert (3)	rouge (3)	PIR (1)
09/09/89	42	27	20	77	71	84
11/10/90	33	20	13	74	67	81
30/08/91	36	24	22	97	104	122
25/08/92	35	22	19	85	83	80
28/06/93	41	26	20	108	107	121
13/08/97	63	28	31	142	98	129

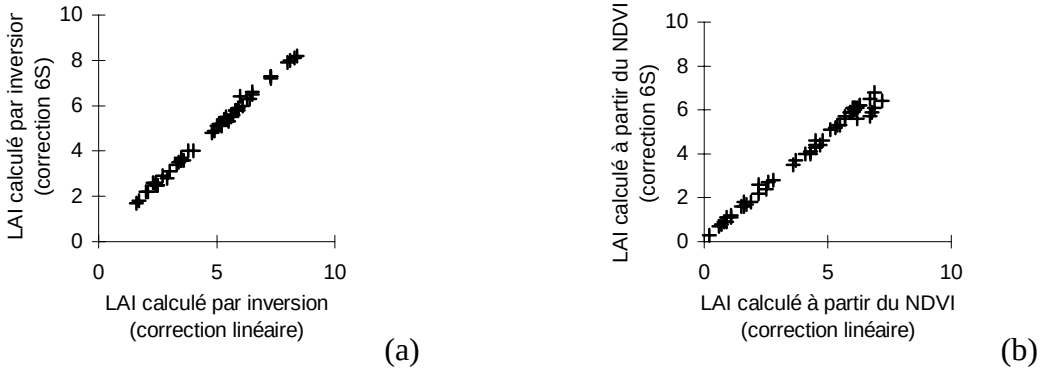
Tableau 0.6 : Valeurs de référence, en compte numérique, des images brutes, avant normalisation. Comptes numériques moyens des pixels de végétation homogène et dense (1), de surfaces d'eau (2) et d'un parking (3). On suppose (2) et (3) lambertiens.

	Réflectance inférieure de référence			Réflectance supérieure de référence		
Date	vert (1)	rouge (1)	PIR (2)	vert (3)	rouge (3)	PIR (1)
09/09/89	3,4%	1,9%	4,8%	25,3%	31%	55,3%
11/10/90	3,4%	1,9%	4,8%	25,3%	31%	55,9%
30/08/91	3,4%	1,9%	4,8%	25,3%	31%	55,7%
25/08/92	3,7%	2,1%	4,8%	25,3%	31%	57,1%
28/06/93	3,5%	2,0%	4,8%	25,3%	31%	55,5%
13/08/97	3,5%	2,0%	4,8%	25,3%	31%	56,0%

Tableau 0.7 : Réflectances de référence des différentes images après normalisation. Réflectances des parcelles homogènes denses (1) simulées avec le modèle

DART. Réflectance de surfaces d'eau (2) et d'un parking (3) supposés lambertiens, de l'image pré-corrigée 6S du 10/07/94.

Cette normalisation directe a été comparée a celle utilisant une pré-correction 6S. Pour cela, nous avons utilisé l'image de 1994 que nous avons corrigée avec les deux méthodes. Il résulte que les différences en réflectance sur la forêt sont inférieures à 0,33% en absolu pour les canaux XS1 et XS2, soit la précision du codage sur un octet. Pour le canal XS3, les différences entre les réflectances obtenues avec la correction linéaire pure et celles obtenues avec la correction 6S sont comprises entre -2% et 1% en absolu pour 98% des pixels de la forêt. Elles sont nulles pour 48% des pixels de la forêt. L'étude de l'influence de ces erreurs sur le calcul du LAI est importante. Elle est illustrée par la Figure 0.4, pour le cas de l'obtention du LAI par inversion et de manière empirique avec le NDVI. Les résultats et les méthodes sont décrits dans les paragraphes suivants. Dans l'ensemble, l'influence de la méthode de correction est faible, particulièrement pour la méthode d'obtention du LAI par inversion, qui s'avère être moins sensible au bruit.



(a) (b)

Figure 0.4 : Influence du mode de correction atmosphérique sur le calcul du LAI pour l'image de 1994. (a) calcul par inversion, (b) calcul à partir du NDVI.

Distinction entre les différentes espèces.

La forêt de Fontainebleau comporte un nombre important d'espèces d'arbres. Chacune a des caractéristiques foliaires et une structure propre. Différents stades de développement et donc différentes structures sont aussi présents sur le site. Toutes ces particularités forment autant de cas possibles de modélisation du paysage et de sa réflectance, et donc de cas d'inversion. Le but de cette étude était d'arriver si possible à une méthode opérationnelle. Pour simplifier le problème, nous avons donc considéré un seul mode de représentation du paysage, c'est-à-dire

un seul type de modélisation. L'inversion ainsi réalisée à partir de cette modélisation n'est pas optimale pour tous les types de couvert présents (perchis, gaulis, futaies, ...).

Il existe cependant une possibilité d'amélioration importante à ce niveau. En effet, la classification permet de distinguer assez facilement les différentes espèces et les différents stades de développement (Demarez, 1997). De plus le parcellaire ONF nous fournit également des informations sur la structure des parcelles. Il serait alors facile d'appliquer pour chaque type de couvert une méthode d'inversion adaptée, c'est-à-dire basée sur des simulations spécifiques. Cependant, augmenter la précision d'un point particulier n'a de sens que si la précision de l'ensemble évolue de la même façon. Or les informations disponibles, concernant notamment la réflectance foliaire, la structure et la réflectance du sous-bois, nous ont semblé insuffisamment précises et donc incompatibles avec ce type d'amélioration. C'est pour cela que nous ne l'avons pas envisagée ici.

Choix des paramètres libres et fixes de l'inversion.

L'objectif de cette étude était d'obtenir des cartes de LAI à partir des images SPOT. Le LAI d'une parcelle dépend à la fois de la densité volumique foliaire des arbres u_f et du taux de recouvrement τ. Ces deux paramètres pouvant varier de manière importante sur le site de Fontainebleau, nous les avons laissés libres. A une date donnée, les images SPOT fournissent trois valeurs de réflectance, une par canal spectral, en chaque pixel. Il est donc éventuellement possible de laisser un paramètre supplémentaire libre. Cependant, le test de robustesse montre que cela augmente la sensibilité au bruit. Nous avons cependant effectué un test sur les images du 10/07/1994, du 10/07/1995 et du 14/07/96. Le fait de laisser un paramètre libre pour la réflectance du sol augmente de manière sensible le temps de calcul alors que les résultats ne sont pas améliorés.

La réflectance de la végétation est très sensible à la valeur de ω_f, particulièrement dans le PIR. Cependant, toutes les images ont été égalisées à partir de simulations DART, effectuées avec des valeurs particulières de ω_f. Pour l'inversion, nous nous sommes contentés d'utiliser ces valeurs : c'est-à-dire 20%, 12%, et 96% dans le vert, le rouge et le PIR, avec $\tau_f=\rho_f$. Ces valeurs sont adaptées uniquement aux couverts de feuillus. En effet, elles ont été calculées par ajustement du modèle DART à partir de valeurs de réflectance maximales de l'image SPOT de 1994, correspondant à des parcelles de feuillus. A priori, l'inversion ne sera donc pas adaptée aux couverts de pins. Les valeurs de ω_f peuvent paraître éloignées des mesures (Tableau 0.8) effectuées sur le site (Demarez, 1997). Cependant aucune conclusion ne peut

être faite car ces mesures ne comportent pas d'indication de marge d'erreur. Il faut donc les utiliser avec précaution. De plus, nous avons obtenu nos valeurs à partir des réflectances d'une image SPOT. Elles dépendent donc de la précision de ces réflectances.

Bande spectrale	Réflectance face supérieure	Réflectance face inférieure	Transmittance
Vert	17%	20%	20%
Rouge	6%	10%	5%
PIR	45%	45%	45%

Tableau 0.8 : Réflectances et transmittances des feuilles de chêne mesurées à Fontainebleau (Demarez, 1997).

Calcul de la table de simulations.

Les réflectances ont été simulées pour trois valeurs d'angle zénithal solaire : 20°, 40°, et 60°. Le flux diffus atmosphérique a été supposé isotrope. Le SKYL (pourcentage de flux diffus) est calculé par le modèle 6S avec 15km de visibilité et un profil standard atmosphérique correspondant à la date et au lieu d'acquisition des images SPOT.

Les autres paramètres caractéristiques des simulations sont :

- Trois canaux spectraux XS1, XS2 et XS3.
- Trois valeurs de réflectance du sol : 0%, 10% et 30%.
- Trois valeurs de densité foliaire u_f : 0,2 , 0,4 et 0,8 m^2/m^3.
- Quatre valeurs de taux de recouvrement arboré τ : 0%, 45%, 75% et 100%.
- Maquette de type « 4 arbres », (*cf.* chapitre II). La hauteur du tronc est nulle, la forme du houppier est un ellipsoïde de révolution de hauteur 15 m et de diamètre 10,5 m.

Inversion des images SPOT.

L'inversion est réalisée pour chaque date, avec la table créée précédemment. Les paramètres libres sont la densité foliaire u_f et le taux de recouvrement τ. La réflectance du sol est fixée à 5% dans le vert, 7% dans le rouge et 8% dans le PIR. L'inversion utilise la fonction à 6 paramètres pour représenter la FDRB. Le nombre de simplexes initiaux est fixé à 5. L'interpolation utilisée est de type dérivée imposée. La fonction coût minimisée représente l'erreur relative avec un seuil inférieur sur la réflectance fixé à 10% (*cf.* chapitre II).

Un test de robustesse a été réalisé confirmant la possibilité d'effectuer cette inversion. Les résultats de ce test ont été présentés dans le chapitre II.

Comme déjà indiqué, une inversion a également été réalisée en laissant un degré de liberté pour la réflectance du sol : $\rho_{sol}(\text{vert}) = \alpha \times 0{,}1$, $\rho_{sol}(\text{rouge}) = \alpha \times 0{,}175$ et $\rho_{sol}(\text{PIR}) = \alpha \times 0{,}2$. α est un paramètre libre compris entre 0 et 1. La précision des valeurs de LAI ainsi obtenues n'a pas été améliorée. L'utilisation d'une réflectance de sol fixe est donc suffisante dans ce cas, car le paysage est, en général, constitué de couverts arborés denses.
L'inversion avec deux paramètres libres, d'une image 1000×1000, dure en moyenne 12 heures sur une station IBM RISC 6000.
Les résultats de l'inversion sont présentés et commentés dans les paragraphes suivants.

Résultats.

Résultats d'inversion.

L'inversion permet d'obtenir pour chaque date une image de LAI, une image de taux de recouvrement et une image de densité foliaire. Ces trois images ne représentent en réalité que deux paramètres libres. Dans le cas d'inversion, avec un degré de liberté pour la réflectance du sol, on obtient aussi une image de ce paramètre.
Une image du RMSE résultant après minimisation est également disponible.
Les valeurs de RMSE finales sont très inférieures à 0,01 sur la végétation. Le minimum sur lequel s'est arrêtée la procédure d'inversion est donc relativement faible. Cela signifie que la modélisation adoptée permet de bien représenter la réflectance d'un pixel de forêt. Ce résultat n'implique cependant pas que les valeurs des paramètres fixes (ω_f), ni celles des paramètres libres obtenues après inversion (LAI, τ) soient exactes. Ainsi, la valeur de ω_f n'est pas forcément constante d'une espèce à l'autre, ni même à l'intérieur d'une même espèce. Le problème ici est de quantifier la précision des valeurs de LAI obtenues par inversion. La réponse à cette question nécessite une étape de validation présentée ultérieurement.
La valeur importante du RMSE sur des pixels autres que ceux de type forêt (Figure 0.5 (a)) permet de créer un masque forêt/non forêt. Ce masque a été appliqué aux images résultats d'inversion (Figure 0.5 (b), (c) et (d)). Ce procédé permet en outre d'éliminer de l'image de LAI certains pixels des parcelles de semenciers. Nous obtenons ainsi les faibles valeurs de LAI caractéristiques de ces parcelles. Cependant, le seuil de RMSE étant subjectif, cette option n'a pas été retenue lors de la comparaison du LAI inversé avec le LAI mesuré. Il s'agit encore une fois de privilégier l'aspect opérationnel et non pas d'obtenir les meilleurs résultats possibles pour un cas particulier.

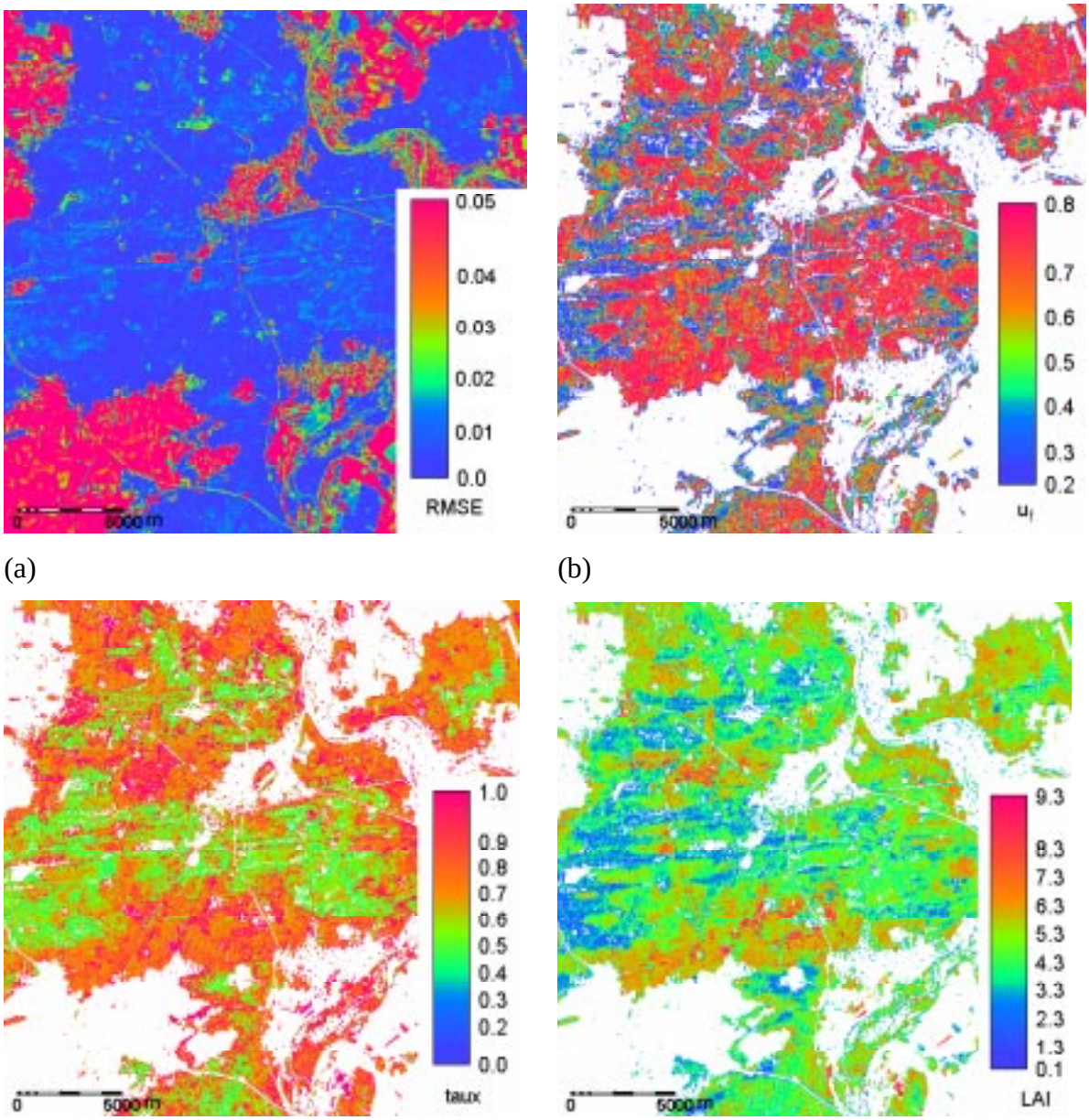


Figure 0.5 : Résultats d'inversion de l'image SPOT du 10/07/94. (a) RMSE, (b) densité foliaire (m^2/m^3), (c) taux de recouvrement et (d) LAI.

Calcul du LAI à l'aide de relations empiriques.

Les données radiométriques (images satellitales) peuvent être reliées au LAI à partir de relations empiriques. Ces relations sont obtenues en ajustant une fonction (exponentielle, puissance, polynomiale, ...) à partir des valeurs mesurées de LAI et des données

radiométriques. La donnée radiométrique est en général convertie en indice de végétation tel que le NDVI : $NDVI = \frac{\rho_{pir} - \rho_{rouge}}{\rho_{pir} + \rho_{rouge}}$, ou bien en simple rapport SR : $SR = \frac{\rho_{pir}}{\rho_{rouge}}$

Cette opération a pour but d'obtenir un seul canal fortement corrélé à la quantité de végétation, et peu sensible aux effets atmosphériques et aux variations des conditions d'éclairement.

Nous avons établi des relations empiriques à partir de l'image SPOT du 14/07/96, date pour laquelle les mesures de LAI sont suffisamment nombreuses. Les relations empiriques sont établies entre le LAI mesuré et le NDVI (ou SR) moyen de la parcelle, calculé avec les images en réflectance corrigée des effets atmosphériques et les images en réflectance TOA (au sommet de l'atmosphère). On utilise trois types de relation : polynomiale de degré 2, puissance et exponentielle. Les relations empiriques peuvent être obtenues en utilisant l'ensemble des 51 parcelles toutes espèces confondues (Figure 0.6), ou bien en effectuant une distinction entre parcelles de pins (Figure 0.7) et parcelles de feuillus (Figure 0.8 à Figure 0.11). Les relations obtenues sont alors différentes. Compte tenu du problème que pose la mesure du LAI sur les pins, nous avons préféré utiliser les relations établies sur les feuillus uniquement (Figure 0.8 à Figure 0.11). De plus, ceci est cohérent avec le fait que la méthode d'inversion utilisée est adaptée aux feuillus.

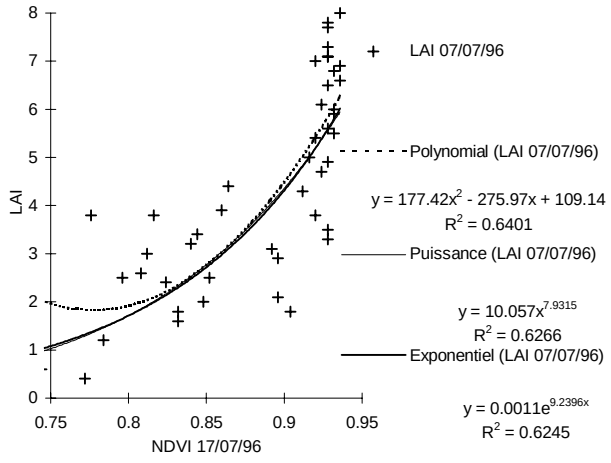


Figure 0.6 : Loi LAI=*f*(NDVI) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour la totalité des 51 parcelles (pins et feuillus). Le NDVI est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au niveau du sol.

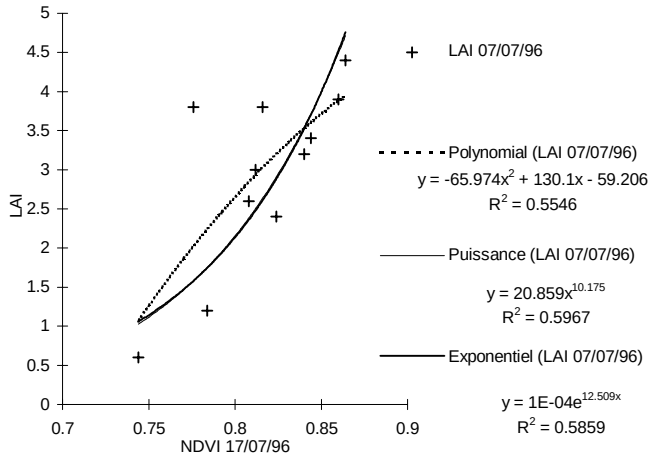


Figure 0.7 : Loi LAI=*f*(NDVI) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 13 parcelles de pins uniquement. Le NDVI est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au niveau du sol.

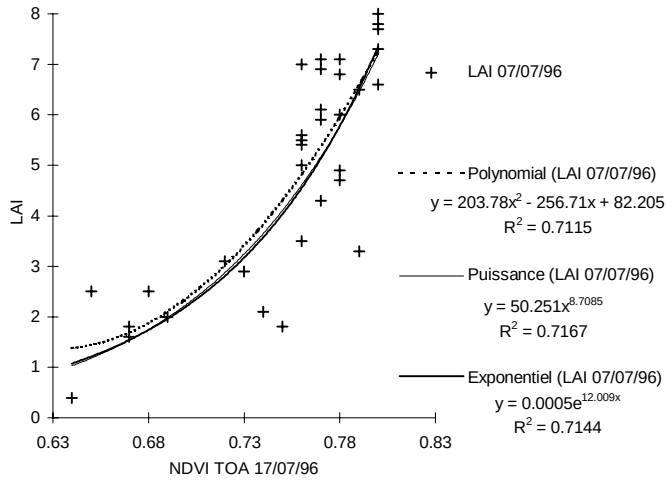


Figure 0.8 : Loi LAI=*f*(NDVI TOA) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 38 parcelles de feuillus uniquement. Le NDVI TOA est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au sommet de l'atmosphère.

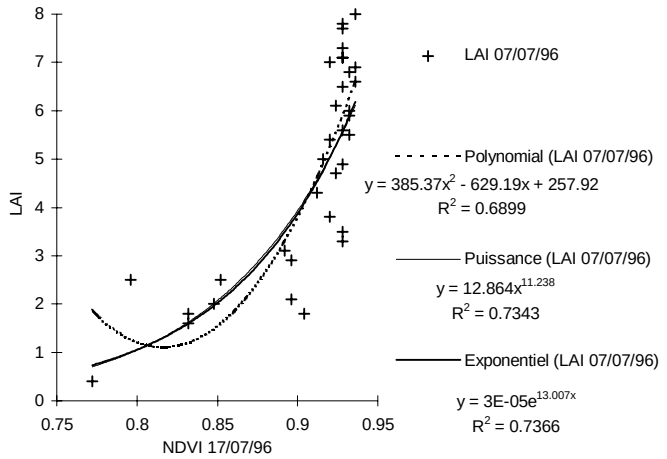


Figure 0.9 : Loi LAI=*f*(NDVI) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 38 parcelles de feuillus uniquement. Le NDVI est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au niveau du sol.

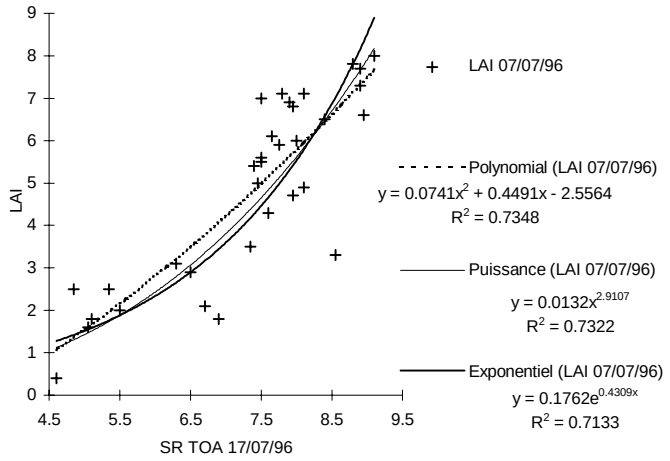


Figure 0.10 : Loi LAI=*f*(SR TOA) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 38 parcelles de feuillus uniquement. Le SR TOA est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au sommet de l'atmosphère.

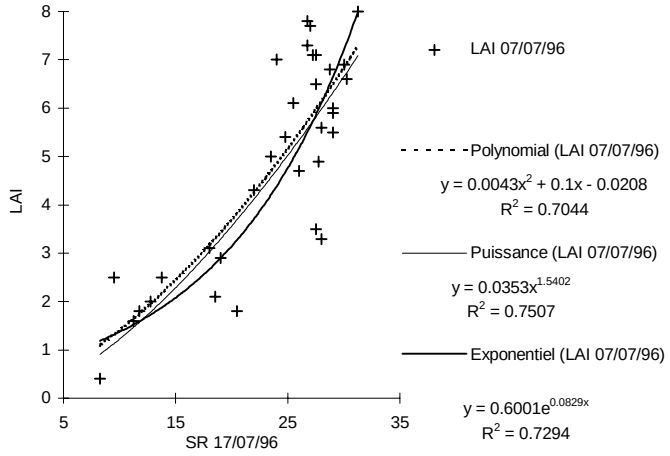


Figure 0.11 : Loi LAI=*f*(SR) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 38 parcelles de feuillus uniquement. Le SR est calculé avec les images XS2 et XS3 converties en réflectance au niveau du sol.

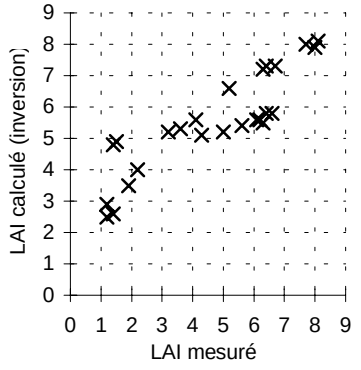
La relation polynomiale LAI=*f*(NDVI) possède 3 degrés de liberté pour s'ajuster au mieux aux données, contrairement aux deux autres fonctions qui n'en possèdent que deux. Il est donc à priori normal que cette fonction donne en général de meilleurs résultats. Certaines de ces caractéristiques sont cependant très gênantes. En effet pour une valeur de LAI donnée il peut correspondre deux valeurs de NDVI (Figure 0.9). De plus la relation obtenue est peut-être performante sur le domaine où elle a été établie, mais elle peut donner des valeurs totalement

aberrantes pour des valeurs peu éloignées de ce domaine. Nous n'avons donc pas retenu la relation polynomiale. En ce qui concerne les fonctions puissance et exponentielle, la première donne des résultats légèrement meilleurs, nous l'avons donc retenue. Les deux relations pourraient cependant être utilisées.

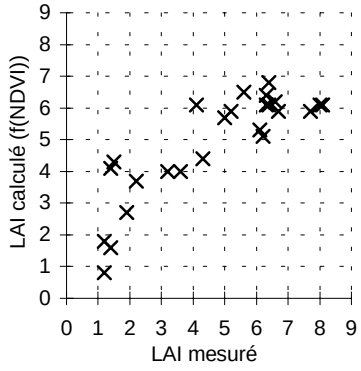
Nous disposons donc de quatre relations donnant le LAI en fonction du NDVI, du NDVI TOA, du SR ou du SR TOA. Nous pouvons appliquer ces relations aux différentes images SPOT, comparer les résultats avec ceux obtenus par inversion, et surtout observer la stabilité d'une relation empirique obtenue pour une date donnée lorsqu'on l'applique à d'autres dates.

Validation des procédures de calcul du LAI à partir des mesures terrains.

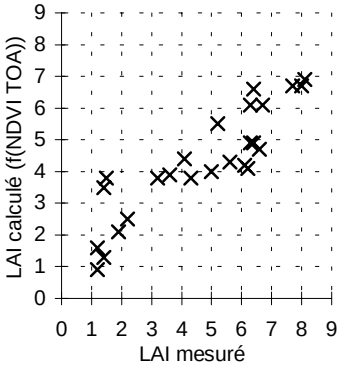
Nous disposons d'images de LAI calculé superposables aux images SPOT, et de mesures de LAI pour 38 parcelles de feuillus et pour 4 dates. La comparaison a été réalisée en effectuant la moyenne du LAI calculé, à l'intérieur de chaque parcelle, pour les différentes images. Les résultats peuvent être interprétés sur les différents graphiques (Figure 0.12 à Figure 0.15) ou dans le tableau donnant le RMSE entre les valeurs de LAI mesurées et calculées (Tableau 0.9).



(a)

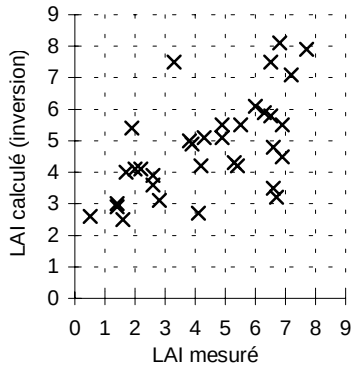


(b)

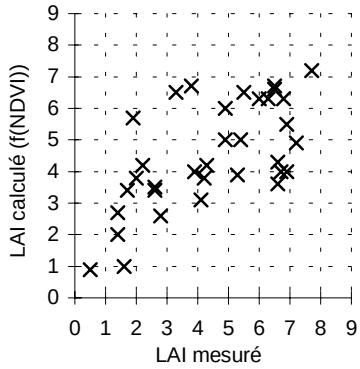


(c)

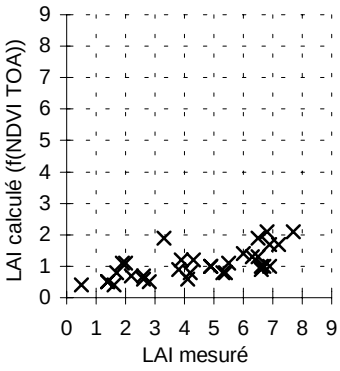
Figure 0.12 : Relation entre le LAI calculé et le LAI mesuré pour l'année 1994, sur les 38 parcelles de feuillus. Les méthodes de calcul sont : (a) inversion, (b) relation empirique à partir du NDVI, (c) relation empirique à partir du NDVI TOA.



(a)

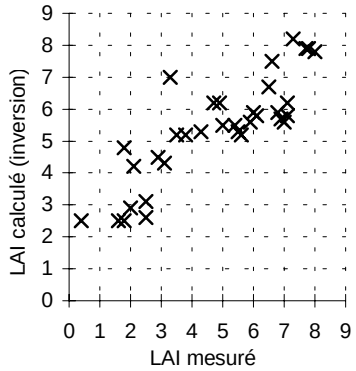


(b)

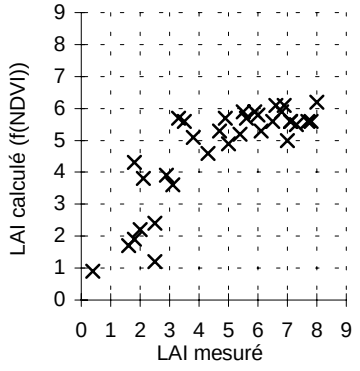


(c)

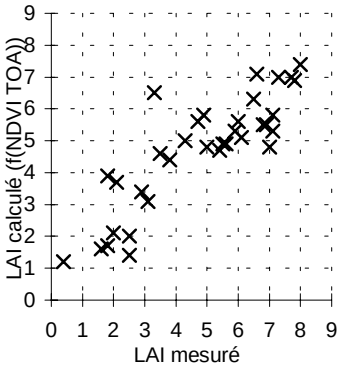
Figure 0.13 : Relation entre le LAI calculé et le LAI mesuré pour l'année 1995, sur les 38 parcelles de feuillus. Les méthodes de calcul sont : (a) inversion, (b) relation empirique à partir du NDVI, (c) relation empirique à partir du NDVI TOA.



(a)

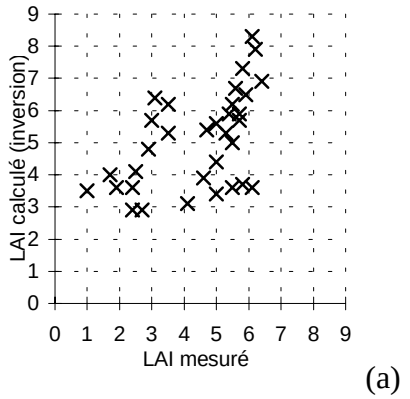


(b)

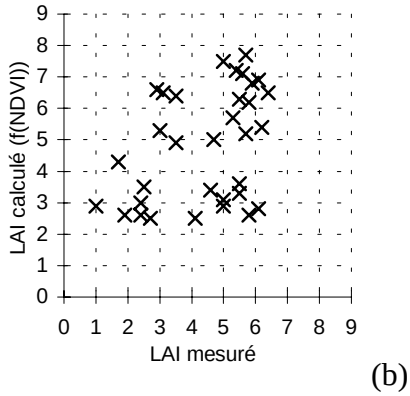


(c)

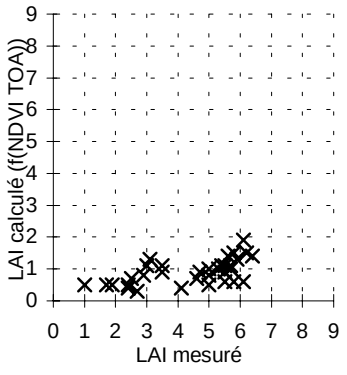
Figure 0.14 : Relation entre le LAI calculé et le LAI mesuré pour l'année 1996, sur les 38 parcelles de feuillus. Les méthodes de calcul sont : (a) inversion, (b) relation empirique à partir du NDVI, (c) relation empirique à partir du NDVI TOA.



(a)



(b)



(c)

Figure 0.15 : Relation entre le LAI calculé et le LAI mesuré pour l'année 1997, sur les 38 parcelles de feuillus. Les méthodes de calcul sont : (a) inversion, (b) relation empirique à partir du NDVI, (c) relation empirique à partir du NDVI TOA.

La première conclusion est que pour les années 1995 et 1997 les relations empiriques utilisant les données TOA ne donnent pas de bons résultats (Tableau 0.9, Figure 0.13 (c) et Figure 0.15 (c)). Ceci peut être lié avec le fait que la correction des effets atmosphériques à l'aide du modèle 6S et des profils n'a pas donné de bons résultats sur l'image de 1995. Ce résultat est très important puisqu'il indique qu'en l'absence de correction atmosphérique, une relation empirique établie avec une image peut donner de mauvais résultats lorsqu'elle est appliquée à une autre image. Quelle que soit la méthode utilisée, la correction atmosphérique des images est donc généralement nécessaire.

La deuxième conclusion est qu'on ne peut pas dire qu'une des méthodes testées soit beaucoup plus performante en terme de précision que les autres. L'avantage de l'inversion ne réside donc pas dans la précision des résultats obtenus.

Pour le traitement des autres images (1989 à 1993), nous avons retenu deux méthodes : d'une part l'inversion, d'autre part l'utilisation du NDVI à partir des données corrigées des effets atmosphériques.

Date	Inversion	f(NDVI)	f(SR)	f(NDVI TOA)	f(SR TOA)
10/07/94	1,30	1,14	1,24	1,07	1,08
10/07/95	1,51	1,44	1,89	3,37	3,35
17/07/96	1,12	1,09	1,03	0,96	0,99
13/08/97	1,38	1,61	2,96	3,18	3,17

Tableau 0.9 : Erreur (RMSE) entre le LAI mesuré sur les 38 parcelles de feuillus et le LAI calculé avec les différentes méthodes pour les différentes dates.

Comparaison de l'inversion des modèles SAIL et DART.

La question de l'utilité du modèle DART, par rapport à d'autres modèles, peut être posée dans le contexte de l'inversion. Ce problème a été abordé de manière simple à partir du modèle SAIL (Verhoef, 1984). L'inversion de ce modèle a été appliquée sur l'image SPOT de 1996. Un seul paramètre libre a été utilisé : le LAI. Les valeurs de ω_f sont les mêmes que celles utilisées pour l'inversion du modèle DART. En fait, dans le cas de couverts très homogènes, les réflectances DART et SAIL sont très proches. Le LAD est considéré comme sphérique. La méthode d'inversion utilisée est une minimisation de la fonction coût par la procédure du simplexe. La comparaison visuelle des résultats indique que l'inversion du modèle SAIL sous-estime le LAI par rapport à l'inversion du modèle DART. La Figure 0.16 confirme ce résultat. Ceci est logique, car la distribution turbide des éléments foliaires, hypothèse du modèle SAIL, optimise le pouvoir diffusant du couvert. Par ailleurs, le RMSE entre le LAI obtenu par inversion du modèle SAIL et les mesures atteint 1,52 au lieu de 1,12 pour l'inversion de DART. Ces résultats confirment le fait que le modèle SAIL est moins bien adapté aux milieux hétérogènes, comme les forêts, que le modèle DART.

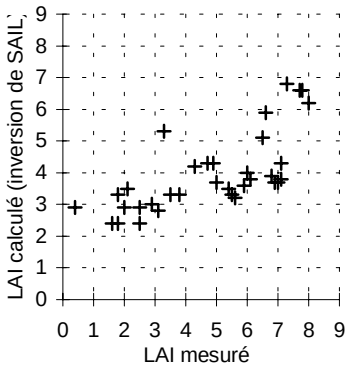


Figure 0.16 : Comparaison entre le LAI mesuré et le LAI obtenu par inversion de SAIL sur les 38 parcelles de feuillus, pour l'images du 17/07/96

Analyse de la série d'images de LAI.

La comparaison visuelle de l'ensemble des images de LAI, pour les années 1989 à 1997, peut apporter des informations intéressantes. La Figure 0.17 représente l'ensemble des images de LAI obtenues par inversion, tandis que la Figure 0.18 représente celles obtenues avec une relation empirique LAI=*f*(NDVI). Afin de faciliter la comparaison, l'échelle de représentation du LAI est la même pour toutes les images. L'analyse visuelle permet en particulier de s'assurer de la stabilité des résultats obtenus et de détecter des anomalies éventuelles.

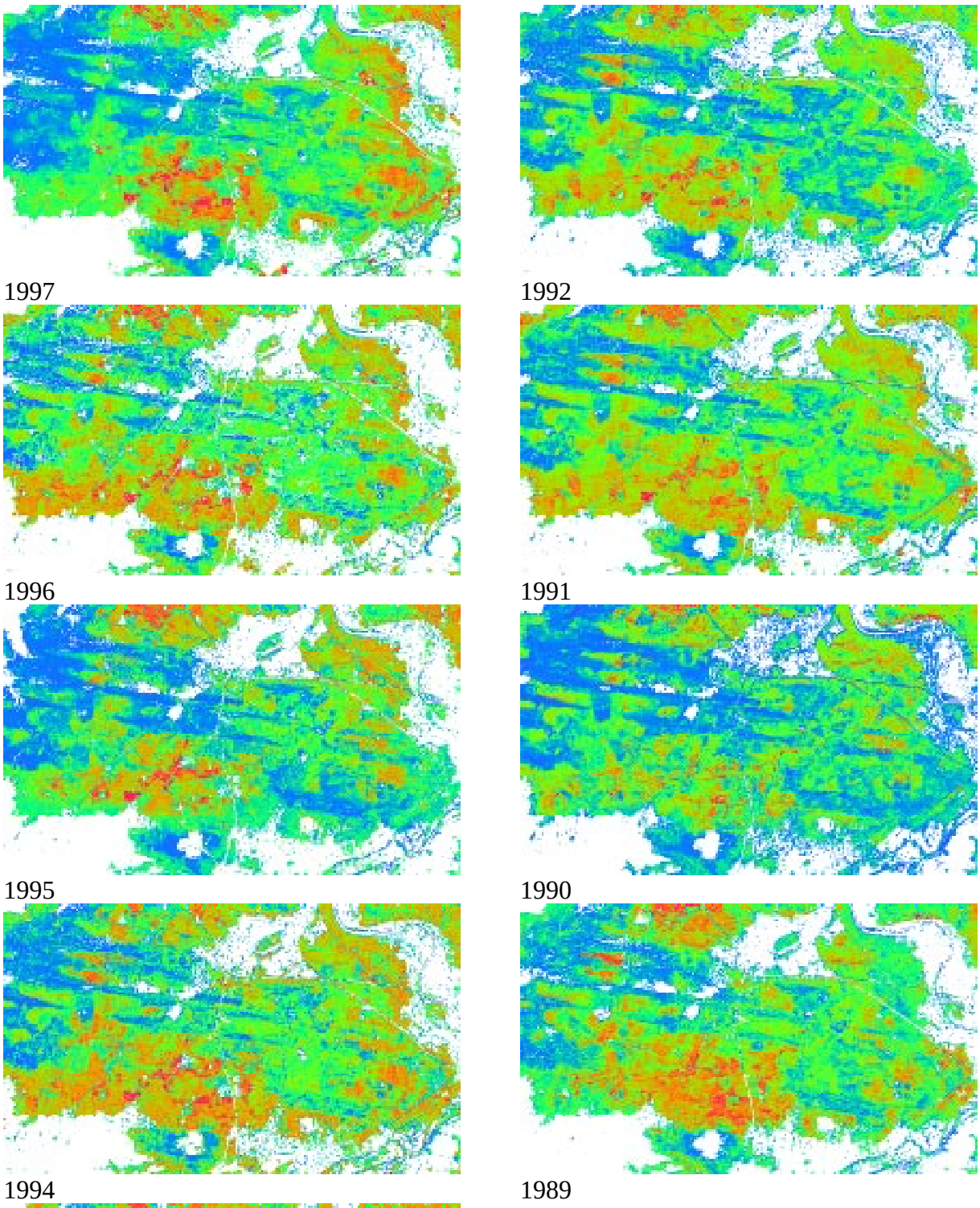


Figure 0.17 : Évolution du LAI entre 1989 et 1997 sur la forêt de Fontainebleau. Les images de LAI sont dérivées des images SPOT en utilisant la procédure d'inversion du modèle DART

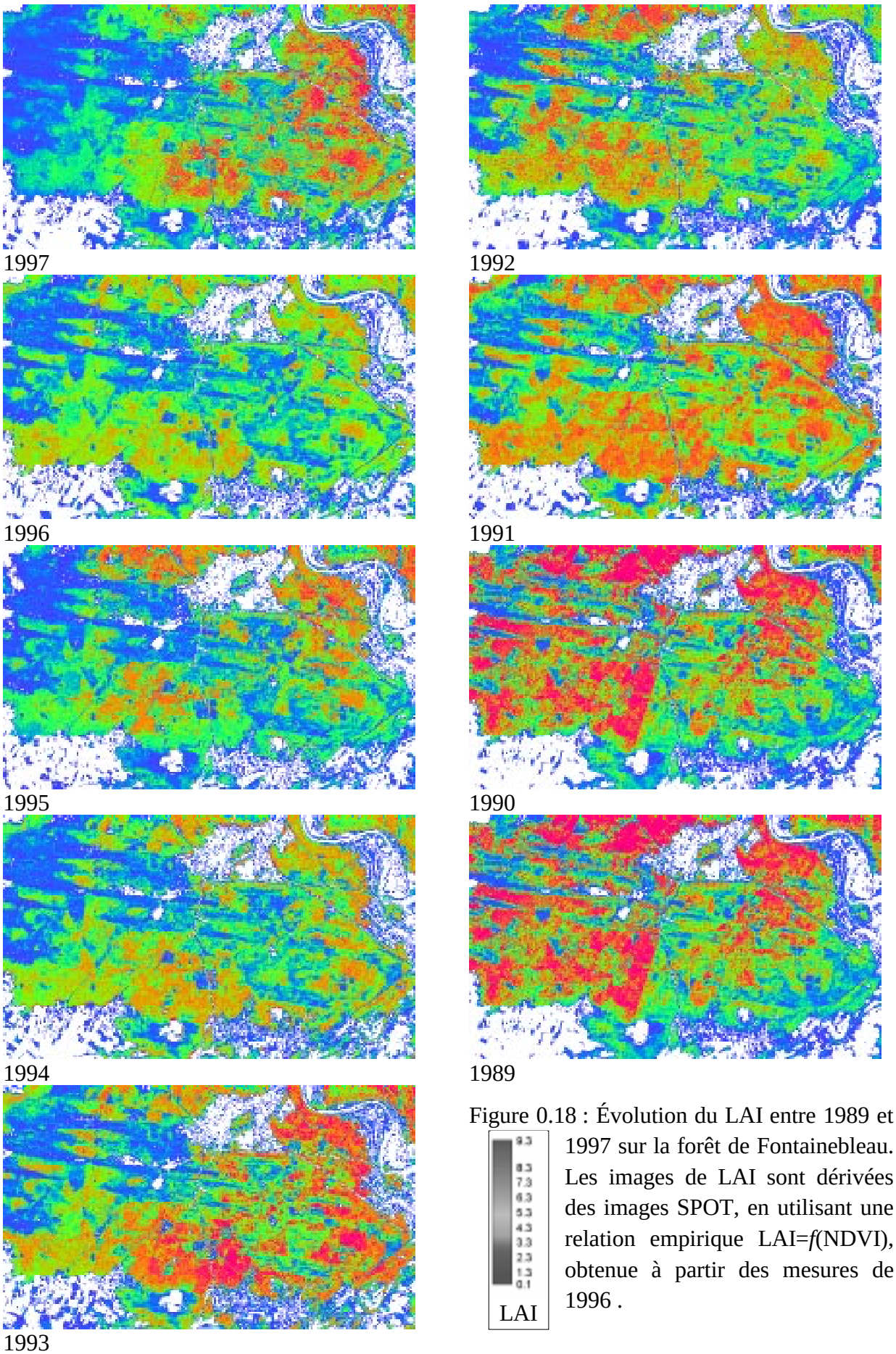


Figure 0.18 : Évolution du LAI entre 1989 et 1997 sur la forêt de Fontainebleau. Les images de LAI sont dérivées des images SPOT, en utilisant une relation empirique LAI=*f*(NDVI), obtenue à partir des mesures de 1996 .

L'analyse quantitative des résultats a été effectuée précédemment (*cf.* IV.3.3). Il en est ressorti que pour les 38 parcelles de feuillus, l'estimation du LAI par inversion est aussi précise, par rapport à la réalité, qu'une estimation à partir du NDVI. L'analyse visuelle, c'est-à-dire l'analyse de la distribution spatiale du LAI, permet d'étendre la comparaison entre les deux méthodes.

Les images obtenues à partir du NDVI sont très sensibles à la qualité radiométrique des images SPOT. Le défaut de l'image de 1997 (*cf.* IV.2.2) se répercute sur l'image de LAI. On remarque en effet une nette diminution sur le coté gauche de l'image correspondant à une des barrettes du capteur (Figure 0.18). Ce même défaut est visible sur les images de 1993 (surestimation du coté droit), 1990 (sous-estimation du coté droit) et 1989 (surestimation du coté droit). Ce défaut ne se répercute pas de manière aussi flagrante sur les images obtenues par inversion. L'utilisation du NDVI calculé à partir des canaux vert et PIR permet de minimiser ce phénomène, comme on le verra dans un paragraphe suivant.

La forte variabilité du LAI sur l'ensemble de la série (Figure 0.17 et Figure 0.18), conduit à se poser la question de la faisabilité du suivi de l'évolution de la végétation par l'intermédiaire d'images SPOT. L'information utile n'est elle pas masquée par les différents bruits dus, en particulier, aux effets atmosphériques ?

Comparaison des deux images de 1996.

On dispose de deux images exploitables en 1996, celle d'avril étant trop nuageuse. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec ces deux images acquises à presque deux mois d'intervalle (17/07/1996 et 05/09/1996). Cela permet de vérifier si le LAI obtenu à partir d'images satellites acquises pendant l'été est bien représentatif du LAI maximum durant la saison. D'autre part, cela nous renseigne également sur la qualité des corrections atmosphériques.

L'inversion donne des résultats similaires en terme de RMSE entre l'image du 17/07/96 et celle du 05/09/96 (Tableau 0.10). Les différences sont plus importantes en ce qui concerne l'utilisation de la relation empirique à partir du NDVI.

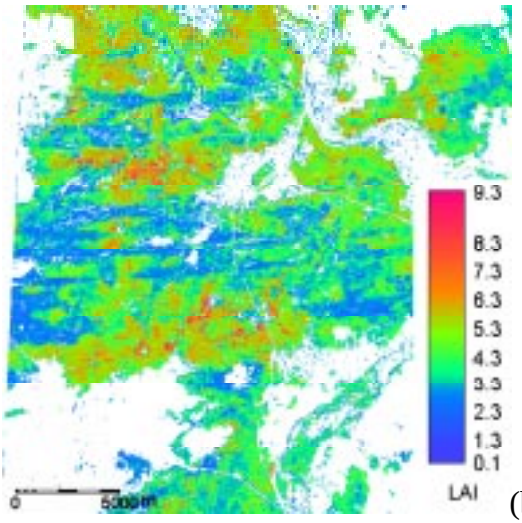
Inversion de DART		LAI = f(NDVI)	
17/07/96	05/09/96	17/07/96	05/09/96
1,12	0,95	1,09	1,46

Tableau 0.10 : Erreur (RMSE) entre le LAI mesuré en juillet 1996 sur les 38 parcelles de feuillus et le LAI calculé avec les images du 17/07/96 et du 05/09/96.

La comparaison visuelle des deux images de LAI fait apparaître une légère diminution du LAI entre l'image du 17/07/96 et celle du 05/09/96 (Figure 0.19). On peut attribuer cette diminution soit à l'évolution de la végétation, soit aux erreurs de corrections atmosphériques. Il serait intéressant de disposer de plusieurs séries annuelles d'images pour d'une part vérifier la robustesse du processus de correction atmosphérique utilisé et d'autre part évaluer les changements annuels de la végétation.

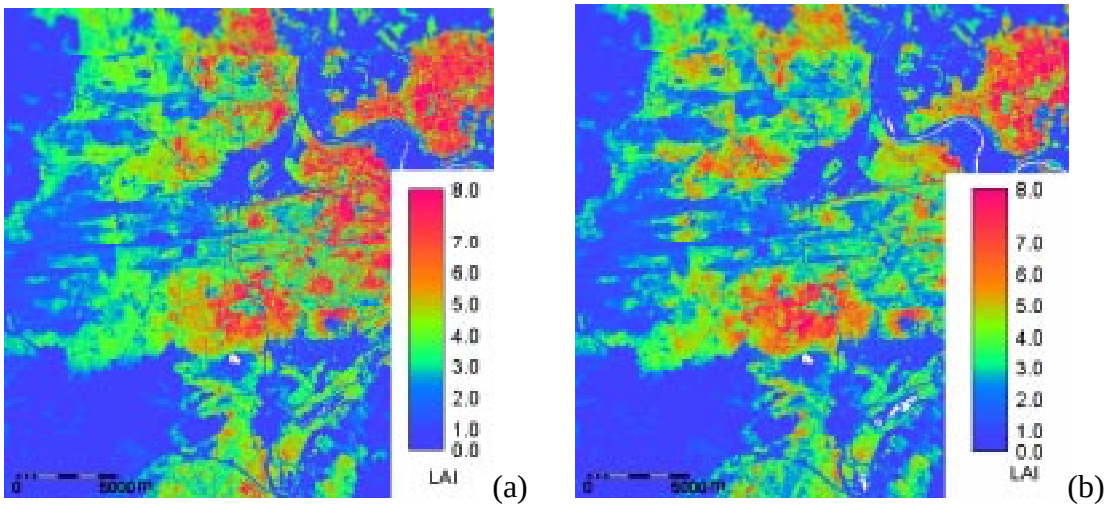
Calcul du NDVI à partir du canal vert.

L'erreur d'étalonnage entre détecteurs du canal XS2 de l'image du 13/08/97 a une répercussion très forte sur l'image de LAI obtenue à l'aide du NDVI (Figure 0.20 (a)).



(a) (b)

Figure 0.19 : Cartes du LAI obtenues par inversion, avec les images SPOT du 17/07/1996 (a) et du 05/09/1996 (b).



(a) (b)

Figure 0.20 : Cartes du LAI obtenues avec l'image SPOT de 1997 en utilisant le NDVI calculé avec les canaux rouge et PIR (a) et avec les canaux vert et PIR (b).

La qualité de l'étalonnage entre détecteurs du canal XS1 étant supérieure, pour cette image, à celle du canal XS2, nous avons envisagé d'utiliser le canal vert à la place du canal rouge dans le calcul du NDVI. Nous avons donc déterminé de nouvelles relations empiriques à partir des mesures de 1996 (Figure 0.21), et nous les avons appliquées aux images de 1994 à 1997.

Les valeurs de RMSE obtenues indiquent que l'utilisation du canal vert ou du canal rouge pour le calcul du NDVI et du LAI fournit des résultats équivalents (Tableau 0.11).

En fait, la simple analyse visuelle montre que pour l'image SPOT du 13/08/97, l'image de LAI obtenue à partir du NDVI calculé avec le canal vert (Figure 0.20 (b)), est de qualité nettement supérieure à celle obtenue en utilisant le NDVI calculé avec le canal rouge (Figure 0.20 (a)). Sa cohérence spatiale est en effet bien meilleure. En conclusion, il est important de choisir le canal XS1 ou XS2 en fonction de la qualité de l'étalonnage entre détecteurs, pour calculer le NDVI et le LAI à l'aide de relations empiriques.

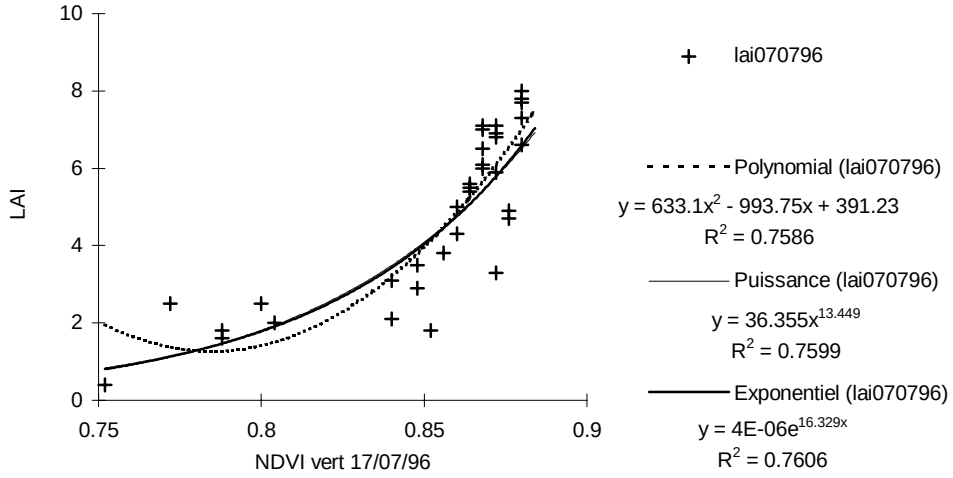


Figure 0.21 : Loi LAI=*f*(NDVI vert) obtenue avec l'image SPOT du 14/07/96 pour les 38 parcelles de feuillus uniquement. Le NDVI vert est calculé avec les images XS1 et XS3 converties en réflectance au niveau du sol.

Date	Inversion	f(NDVI)	f(NDVI vert)
10/07/94	1,30	1,14	1,26
10/07/95	1,51	1,44	1,89
17/07/96	1,12	1,09	0,95
13/08/97	1,38	1,61	1,42

Tableau 0.11 : Erreur (RMSE) entre le LAI mesuré sur les 38 parcelles de feuillus et le LAI calculé avec les différentes méthodes.

Conclusion

Cette étude a permis de montrer l'aspect opérationnel de la méthode d'inversion du modèle DART développée dans le chapitre II. Son utilisation s'est révélée relativement simple. Les résultats obtenus sont satisfaisants, puisque leur précision est équivalente à celle des résultats obtenus à partir des relations empiriques. Le temps de calcul est évidemment le point faible de la méthode (12 heures pour une image 1000×1000 sur une station IBM risk 6000).

Au delà des résultats, l'inversion offre un certain nombre d'avantages qu'il est intéressant de souligner :

(1) L'inversion n'a nécessité aucune donnée terrain spécifique. C'est un atout très important lorsque l'on connaît la difficulté d'obtention de mesures fiables, en nombre suffisant, et représentatives.

(2) L'obtention du LAI par inversion est constamment reliée aux phénomènes réels. Il n'y a aucun paramètre de calage qui n'ait sa signification physique ou biologique. A l'opposé, les formules empiriques sont comme leur nom l'indique « empiriques ». Pour les utilisateurs de cartes de LAI, cela est secondaire, seule la fiabilité des résultats importe. Mais, pour les personnes qui travaillent à la création de ces cartes, l'utilisation du modèle de transfert radiatif et de son inversion permet de mieux comprendre et interpréter les résultats. Les erreurs éventuelles sont plus facilement explicables.

(3) L'inversion offre un potentiel de développement et d'amélioration considérable. Ceci est en particulier le cas pour le choix du mode de représentation du paysage et des valeurs des paramètres fixes. Il est ainsi possible d'envisager des méthodes d'inversion adaptées au contexte du pixel traité (type de couvert, ...)

En conclusion cette étude a ouvert la voie à une utilisation plus systématique de la méthode d'inversion, en montrant ses atouts, ses faiblesses et les points à développer dans le futur.

IV INVERSION D'IMAGES SPOT SUR LA FORÊT DE FONTAINEBLEAU.....95
IV.1 Introduction.....95
IV.1.1 Le site d'étude.....96
IV.1.2 Les données disponibles.....97
IV.1.3 Définition, mesure et utilisation du LAI.....97
IV.1.4 Les objectifs de l'étude.....98
IV.2 Traitement et inversion des images SPOT.....99
IV.2.1 Extraction des sous-images et géoréférencement.....99
IV.2.2 Qualité radiométriques des images SPOT.....99
IV.2.3 Normalisation des réflectances SPOT.....101
IV.2.4 Distinction entre les différentes espèces.....106
IV.2.5 Choix des paramètres libres et fixes de l'inversion.....107
IV.2.6 Calcul de la table de simulations.....108
IV.2.7 Inversion des images SPOT.....108
IV.3 Résultats.....109
IV.3.1 Résultats d'inversion.....109
IV.3.2 Calcul du LAI à l'aide de relations empiriques.....110
IV.3.3 Validation des procédures de calcul du LAI à partir des mesures terrains.....114
IV.3.4 Comparaison de l'inversion des modèles SAIL et DART.....117
IV.3.5 Analyse de la série d'images de LAI.....117
IV.3.6 Comparaison des deux images de 1996.....120
IV.3.7 Calcul du NDVI à partir du canal vert.....121
IV.4 Conclusion.....123

INVERSION DE DONNEES MULTISPECTALES ET MULTIDIRECTIONNELLES POLDER

Introduction.

Un axe important de recherche et de développement des capteurs spatiaux concerne la mesure multidirectionnelle. On peut citer en particulier le programme POLDER, développé par le CNES. Ces capteurs sont capables non seulement de mesurer la luminance des cibles dans différents canaux spectraux, mais également suivant différentes directions de visée. Les mesures directionnelles apportent des informations non redondantes avec les mesures spectrales. Elles peuvent permettre, entre autres, d'améliorer la discrimination des différents types de surface, et autorisent une meilleure classification (Bicheron, 1997). L'apparition de ces capteurs a imposé le développement de nouveaux outils d'analyse et d'interprétation, adaptés au traitement de ce type de donnée. La méthode d'inversion du modèle DART, présentée dans le chapitre II, a été développée en partie dans ce sens. L'étude présentée dans ce chapitre a été réalisée dans le but unique de tester notre capacité d'inverser le modèle DART avec des données multispectrales et multidirectionnelles. Nous avons utilisé pour cela un jeu de données POLDER aéroporté acquis lors de la campagne BOREAS (Sellers *et al.*, 1995) sur la forêt boréale.

Le site d'étude.

Le projet BOREAS a été conduit sur deux sites au nord et au sud de la forêt boréale canadienne (Figure 0.1), couvrant une superficie respectivement de 8000 km^2 et 11170 km^2. La végétation est constituée essentiellement de différentes espèces de pins, dont l'épinette noire, et de trembles.

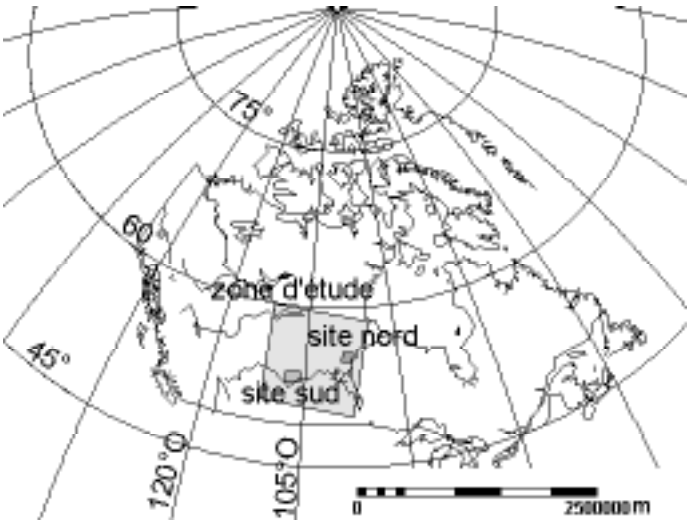


Figure 0.1 : Situation des sites d'étude de la campagne BOREAS.

Les données disponibles.

Les différents sites ont été survolés par le capteur POLDER embarqué à bord d'un avion Hercule C130. Les données acquises ont été traitées au CESBIO afin d'extraire d'une part, des FDRB (Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle) globales pour les sites d'étude et d'autre part, des images multispectrales et multidirectionnelles sur une surface de 5×5 km autour de ces sites (Bicheron, 1997). Les traitements effectués concernent les corrections atmosphériques et géométriques des différentes images. Les données disponibles sont donc directement des valeurs de réflectance en bas de l'atmosphère.

De nombreuses mesures terrain ont été effectuées sur les différents sites. Parmi les paramètres disponibles, certains nous intéressent particulièrement notamment les réflectances et transmittances foliaires des différentes espèces, ainsi que des valeurs de LAI. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre IV, l'utilisation et l'interprétation de ce paramètre sur les pins est très délicate (Chen *et al.*, 1996). Pour cette raison, nous n'avons pas effectué de comparaison entre résultats d'inversion et mesures terrain.

Objectif de l'étude.

L'objectif de cette étude était de tester la procédure d'inversion à partir de données multidirectionnelles afin de mettre en évidence les difficultés et de proposer des solutions.

Le potentiel des données multidirectionnelles a cependant déjà été montré par un nombre important d'essais d'inversion à partir de ce type de mesures (*cf.* chapitre I). La réalisation d'une étude approfondie, avec un objectif thématique précis tel que la recherche du LAI, serait

nécessaire pour vérifier l'intérêt des mesures multidirectionnelles pour l'inversion du modèle DART et l'obtention de paramètres biophysiques. Elle nécessite cependant une base de données de qualité au moins équivalente à celle utilisée sur le site de Fontainebleau. Or nous ne disposons pas pour l'instant de toutes ces données sur le site BOREAS.

Inversion des données POLDER aéroporté.

Choix des paramètres libres.

L'objectif de toute méthode d'inversion est d'obtenir des paramètres biophysiques pertinents. Les paramètres libres de l'inversion pourront être choisis en fonction, par exemple, d'une thématique écologique. Dans le cadre de cette étude, on s'attachera à la recherche du taux de recouvrement et du LAI. Si le modèle est particulièrement sensible à des paramètres ne pouvant pas être mesurés avec précision, il est nécessaire de les laisser libres dans l'inversion. C'est le cas ici de la réflectance du sol ou de ce qui constitue le sous bois.

Compte tenu de ces remarques, les paramètres libres choisis sont le taux de recouvrement, le LAI du houppier et la réflectance du sous-bois dans chaque canal spectral.

Calcul de la table de simulations.

Les réflectances ont été simulées pour quatre valeurs d'angle zénithal solaire : 30°, 40°, 50°, et 60°. Le flux diffus atmosphérique n'a pas été pris en compte dans les simulations. En effet, l'algorithme de correction atmosphérique des données POLDER soustrait la composante due au flux diffus atmosphérique dans la réflectance finale. Cependant, la correction est réalisée en supposant la surface lambertienne. Dans le cas de surfaces fortement anisotropes (cas de couverts arborés avec un taux de recouvrement moyen sur un sol très réfléchissant), cette hypothèse conduit elle a des erreurs importantes ? Un test pourrait être effectué en réalisant l'inversion avec deux tables de simulations, l'une calculée avec un SKYL nul et l'autre avec un SKYL non nul.

La table de simulation a été calculée en considérant les trois bandes spectrales associées aux canaux vert, rouge et PIR du capteur POLDER et en utilisant les paramètres biophysiques suivants :

- Cinq valeurs de réflectance du sol ont été utilisées : 0%, 3,2%, 8%, 20% et 50% quel que soit le canal utilisé. Le modèle de sol du programme d'inversion permet ultérieurement de différencier la réflectance du sol en fonction du canal.
- Cinq valeurs de densité foliaire u_f : 0,06 0,15 0,37 0,94 2,34 et 5,86

- Cinq valeurs de taux de recouvrement τ : 0%, 11%, 26%, 52% et 100%.
- Réflectance et transmittance foliaires extraites de la base de données BOREAS (Tableau 0.1).

La maquette utilisée est de type « arbre », (*cf.* chapitre II). La hauteur du tronc est 3,5m et la forme du houppier est un cône de hauteur 6,5m et de diamètre à la base 2m.

	Vert	Rouge	PIR	
Réflectance face supérieure		0,19	0,115	0,43
Réflectance face inférieure		0,16	0,075	0,46
Transmittance		0,04	0,00	0,31

Tableau 0.1 : Réflectance et transmittance foliaires de l'épinette noire.

Inversion et résultats.

Inversion de FDRB POLDER mesurées sur différents sites.

Des FDRB ont été synthétisées sur différents sites à partir des différents vols.

L'inversion de ces FDRB est réalisée avec 5 paramètres libres. La fonction coût utilisée est l'erreur absolue. Le temps de calcul pour l'inversion d'un FDRB est de l'ordre de 2 minutes avec 5 paramètres libres et un nombre de simplexes initiaux maximum fixé à 15.

Les résultats indiquent que la modélisation choisie permet de reconstituer de manière correcte la FDRB mesurée (Figure 0.2). Cela ne permet en aucun cas de conclure quand à la validité des paramètres obtenus.

Concernant la qualité des FDRB POLDER, on peut rappeler un détail surprenant. Les réflectances POLDER aéroporté ont tendance à diminuer pour les grands angles zénithaux de visée, dans la direction de diffusion avant (Figure 0.2). Or les mesures PARABOLA acquises sur les mêmes sites, mais en bas de l'atmosphère, ne présentent pas cette particularité (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1998). Une analyse approfondie de ce phénomène serait très intéressante et utile.

L'inversion réalisée ici, a donc simplement permis de montrer la possibilité de reconstruire des mesures POLDER à partir des paramètres obtenus par inversion.

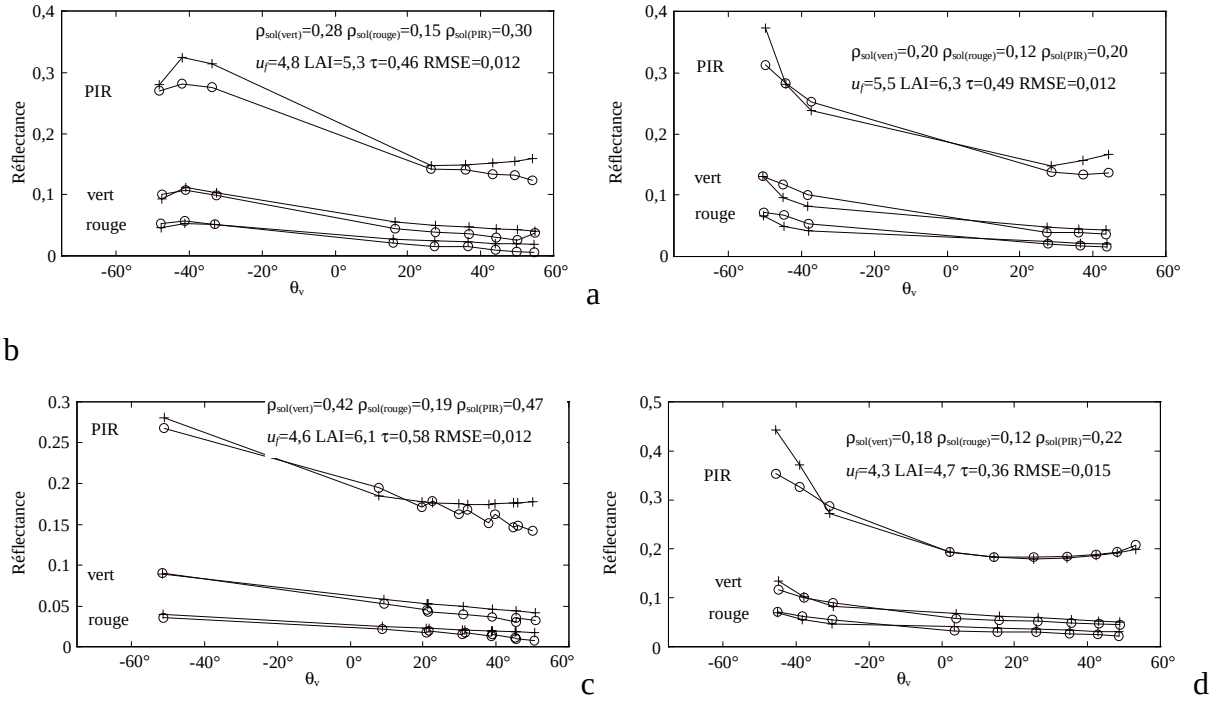


Figure 0.2 : Résultats d'inversion de FDRB POLDER sur différents sites. Réflectances POLDER (o) et simulations correspondantes (+) dans le plan principal (-10°<$\Delta\varphi_{sv}$<10°). (a) Site « Old Black Spruce » (31/05/94), (b) (01/06/94), (c) (21/07/94) et (d) Site « Young Jack Pine » (01/06/94).

Inversion d'images multispectrales et multidirectionnelles.

L'inversion a été réalisée avec le jeu de simulations obtenu avec les paramètres indiqués dans le paragraphe précédent. Le nombre de paramètres libres est réduit à 4 : la densité foliaire u_f, le taux de recouvrement τ et deux paramètres, a et b, pour la réflectance lambertienne du sol exprimée par : $\rho_{sol(vert)}=a\times0,2+b\times0,2$ $\rho_{sol(rouge)}=a\times0,25+b\times0,05$ et $\rho_{sol(PIR)}=a\times0,3+b\times0,3$.

Ce modèle de réflectance de sol permet de limiter le nombre de paramètres libres tout en autorisant une certaine liberté.

La connaissance de u_f et de τ permet évidemment de calculer le LAI. La procédure d'inversion calcule systématiquement dans ce cas la valeur du LAI.

Les résultats montrent une certaine stabilité spatiale des paramètres obtenus par inversion (Figure 0.3). Une procédure d'inversion peu robuste ou sensible au bruit donne des résultats beaucoup plus bruités et presque aléatoires. Les valeurs de RMSE finales sont faibles (inférieures à 0,02). Ceci est encourageant pour la suite. L'analyse des résultats peut

malheureusement difficilement aller au delà, compte tenu de l'imprécision de notre connaissance des paramètres biophysiques, et en particulier du LAI.

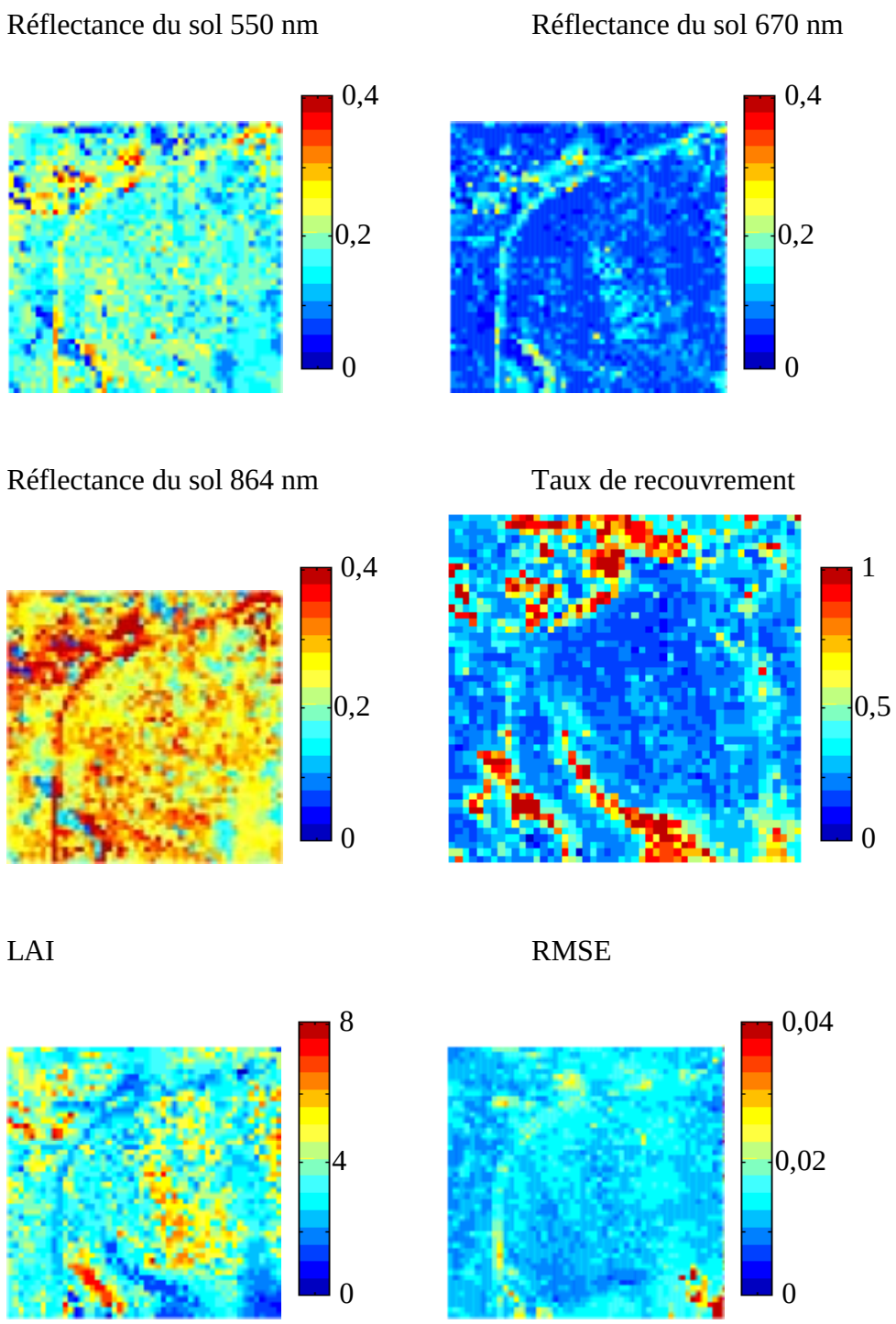


Figure 0.3 : Inversion de l'image multidirectionnelle et multispectrale POLDER aéroporté, acquise sur le site BOREAS « Old Black Spruce » le 21/07/1994.

Amélioration de l'utilisation des données multidirectionnelles.

Des travaux sur l'optimisation de l'utilisation de données multidirectionnelles dans les processus d'inversion ont été réalisés par Gao *et al.* (1997) et Privette *et al.* (1996). Ces travaux posent la question de l'influence de l'échantillonnage et du choix optimal des directions. Privette suggère l'utilisation des poids différentiels (*cf.* chapitre I) pour à la fois choisir les directions fournissant le plus d'information et affecter ce poids dans le calcul de la fonction coût de l'inversion. Cette méthode peut être appliquée aux données POLDER. Son intégration dans la procédure d'inversion du modèle DART constituera une des améliorations futures. Il faudra cependant aussi tenir compte de la fiabilité des mesures. Affecter un poids fort à une direction influente n'a de sens que si l'erreur de mesure correspondante n'est pas trop importante. Ceci implique en particulier une correction atmosphérique de qualité sur l'ensemble des directions utilisées.

Conclusion.

L'objectif relativement simple de cette étude a été atteint : montrer que la procédure d'inversion du modèle DART est opérationnelle sur des mesures multispectrales et multidirectionnelles. Le temps de calcul relativement long (2mn par FDRB) peut être optimisé en limitant le nombre de paramètres libres ou en exploitant mieux les données multidirectionnelles (*cf.* V.3.3).

Concernant les données POLDER spatiales, leur objectif est différent car avec une résolution de 6 km, elles apportent une vision plus globale. Qu'advient-il des valeurs de LAI obtenues par inversion ? Ce type de modèle a-t'il encore un sens à cette échelle ? Une solution peut consister à modéliser le paysage par un ensemble de zones homogènes dont on peut déterminer les surfaces respectives. Cependant, la réponse à ces questions est d'autant plus difficile que l'obtention d'un jeu de données de validation à cette échelle n'est pas aisée. Une réponse peut être apportée par l'utilisation d'échelles intermédiaires en allant progressivement de la haute à la basse résolution.

V INVERSION DE DONNÉES MULTISPECTALES ET MULTIDIRECTIONNELLES POLDER 127
V.1 Introduction. 127
V.1.1 Le site d'étude. 127
V.1.2 Les données disponibles. 128
V.1.3 Objectif de l'étude. 128
V.2 Inversion des données POLDER aéroporté. 129
V.2.1 Choix des paramètres libres. 129
V.2.2 Calcul de la table de simulations 129
V.3 Inversion et résultats. 130
V.3.1 Inversion de FDRB POLDER mesurées sur différents sites. 130
V.3.2 Inversion d'images multispectrales et multidirectionnelles. 131
V.3.3 Amélioration de l'utilisation des données multidirectionnelles. 133
V.4 Conclusion. 133

CONCLUSION

- ***Bilan sur la méthode d'inversion du modèle DART.***

  La méthode présentée dans le chapitre II a permis d'affirmer qu'il est effectivement possible d'inverser le modèle DART. Elle n'est cependant ni la plus rapide, ni la plus robuste, mais l'objectif de l'étude était avant tout de mettre au point une méthode opérationnelle. Elle peut dès maintenant être mise en œuvre dans différentes études utilisant des images satellitales pour la recherche de paramètres biophysiques. Il reste cependant des possibilités de développement très importantes. Notamment l'extension de l'inversion à des paramètres tels que la teneur foliaire en chlorophylle. La méthode d'inversion elle même peut être améliorée avec l'utilisation par exemple de réseaux de neurones. Les procédures d'interpolation ainsi que les maquettes utilisées peuvent également faire l'objet d'améliorations importantes. Cependant le travail réalisé a permis de jeter les bases de l'inversion du modèle DART et de fixer une architecture du programme d'inversion autorisant maintenant un développement rapide et facile.

  Le résultat est donc doublement intéressant puisque d'une part la méthode actuelle est opérationnelle, d'autre part la structure du programme développé autorise un développement futur très important.

- ***Les utilisations possibles de l'inversion.***

  Le deuxième objectif de cette thèse était de montrer l'intérêt de l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif et de son inversion pour l'étude de la végétation, à partir d'images satellitales. Les études sur le Sahel, à partir de données Landsat MSS, et sur la forêt de Fontainebleau, à partir de données SPOT, ont montré que les méthodes d'interprétation de données spatiales basées sur l'inversion ou celles purement empiriques étaient comparables et avaient les mêmes champs d'applications : la recherche de paramètres biophysiques

pertinents pour le suivi des écosystèmes. Les résultats obtenus par l'une ou l'autre des méthodes sont encourageants, et à défaut, pour le moment, d'autres outils de suivi de la végétation à grande échelle, la télédétection spatiale associée à ces méthodes reste un moyen intéressant. Les trois études réalisées dans cette thèse ont mis en avant les différents atouts de l'inversion d'un modèle de transfert radiatif tel que DART. L'inversion permet en particulier une utilisation facile de toutes les données disponibles (mesures multispectrales et multiangulaires, paramètres biophysiques connus du milieu, ...) pour rechercher des paramètres inconnus. De plus, les données sont interprétées par la procédure d'inversion en tant que telles : il est ainsi inutile de normaliser une mesure acquise à 20° par rapport à une acquisition au nadir. Ceci n'est pas le cas de la plupart des méthodes empiriques. Des relations LAI=*f*(NDVI), par exemple, n'utilisent que deux canaux spectraux et sont de plus sensibles aux angles d'éclairement et de visée. D'autre part, l'inversion de modèles de transfert radiatif pour la recherche des paramètres biophysiques permet de prendre en compte les phénomènes physiques réels rentrant en jeu. Ceci facilite l'analyse des résultats et des erreurs. Sur les milieux hétérogènes (forêts, savanes arbustives, ...), un modèle tel que DART, permettant une représentation précise du milieu, facilite l'interprétation des résultats par rapport à un modèle plus simple (SAIL, Kuusk, etc.). De plus, l'inversion de ce type de modèle doit en général donner de meilleurs résultats. L'étude sur la forêt de Fontainebleau confirme ce propos.

Les avantages des méthodes par inversion étant indéniables, leur emploi peut se généraliser à condition que leur utilisation soit simple et accessible. A défaut, les méthodes empiriques faciles à mettre en œuvre seront toujours utilisées. Le développement du programme présenté dans le chapitre II va dans ce sens. Il permettra une généralisation de l'utilisation de la méthode pour les études à venir au sein de notre équipe de recherche et nous l'espérons, dans les laboratoires avec lesquels nous travaillons. C'est en particulier le cas du Goddard Space Flight Center de la NASA où le modèle DART vient d'être installé. Notre collaboration porte sur l'inversion du modèle DART à l'aide de réseaux de neurones, avec Daniel Kimes, et sur l'utilisation du modèle DART en mode direct, avec Donald Deering et couplé avec un modèle de fonctionnement, avec James Collatz.

- ***Opinion générale sur la télédétection spatiale et l'écologie.***

  Les différents cas d'études des chapitres III et IV ont montré le potentiel de la télédétection spatiale pour le suivi des écosystèmes. Nous n'en sommes cependant qu'au stade de la recherche. L'obtention de résultats fiables de manière systématique est encore loin. Trop de paramètres perturbateurs rentrent en jeu, en particulier l'atmosphère. Malheureusement, les investissements déjà engagés ainsi que l'obligation de résultats et de publications toujours plus nombreuses, sont certainement à l'origine d'idées reçues affirmant que la télédétection spatiale permet de manière opérationnelle d'obtenir, par exemple, des paramètres tel que la surface foliaire, ou bien la biomasse. Les contraintes économiques, politiques et sociales peuvent parfois nuire à l'honnêteté scientifique.

  L'utilisation opérationnelle de la télédétection spatiale pour le suivi de la végétation est envisageable dans le futur, sous certaines conditions. Tout d'abord, il est nécessaire d'améliorer les techniques actuelles d'exploitation des images satellitales afin d'obtenir des informations fiables, avec une précision adéquate et connue. Ensuite, il est important de définir les caractéristiques minimales des capteurs spatiaux, nécessaires à l'observation d'un phénomène. Il est évident, par exemple, que l'observation de l'apparition des feuilles sur une parcelle de la forêt de Fontainebleau ne pourra pas se faire avec une résolution spatiale de 1 km ni avec une résolution temporelle de 40 jours. On peut heureusement constater que le milieu de la recherche travaille activement sur ces deux problèmes importants. Un exemple intéressant de développement de techniques d'exploitation des images spatiales, est le travail effectué sur les chaînes de traitement des données POLDER. Elles permettent d'obtenir par exemple des produits tels que le LAI. Un travail similaire a été réalisé avec les données MODIS et MISR. Concernant la définition des capteurs spécialisés dans l'observation de la végétation, on peut citer le projet SPOT4, avec l'instrument « végétation ». Cependant, ces travaux sont récents. Certains sont encore en cours de développement. Cela montre bien qu'il s'agit d'un problème non entièrement résolu. Il est donc toujours nécessaire de parler avec prudence des applications de la télédétection spatiale au suivi de la végétation.

  On peut cependant se poser la question de l'intérêt effectif de la télédétection spatiale et de son application à l'écologie. Permettre une meilleure connaissance de notre environnement ? C'est sans doute l'aspect le plus important. Prévoir l'évolution des écosystèmes et ainsi mieux gérer l'impact de l'activité humaine sur notre environnement ? Encore faut-il que les chiffres avancés par les scientifiques soient suffisamment précis pour

être exploitables et que les politiques fassent le relais et prennent les décisions adéquates. Ces considérations dépassent largement le cadre de cette thèse mais il est intéressant de savoir en définitive à quoi servent les moyens importants utilisés par la recherche.

BIBLIOGRAPHIE.

Abuelgasim, A.A., S. Gopal et A.H. Strahler, 1998. Forward and inverse modelling of canopy directional reflectance using a neural network. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 19, n°3, 453-471.

Achard, F., 1989a. Etude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. *Thèse,* Université Paul Sabatier Toulouse III, 249p.

Achard, F., F. Blasco, F. Lavenu et A. Podaire, 1989b. Etude de la dynamique des formations de contact forêt-savane en Afrique de l'Ouest par télédétection. Bul S.F.P.T., no 114, 2 : 37-39.

Baret, F., J.G.P.W. Clevers, et M.D. Steven, 1995. The Robustness of a Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-Infrared Reflectances : A comparison of Approaches. *Rem. Sens. Env.*, 54:141-151.

Bicheron, P., 1997. Apport des données multidirectionnelles de l'instrument POLDER pour le suivi de la végétation terrestre. *Thèse,* Université Paul Sabatier Toulouse III, 72 p.

Bicheron, P. et M. Leroy, 1998. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Rem. Sens. Env.*, soumis.

Bille, J.C., 1992a. Tendances évolutives comparées des parcours d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique de l'Est. L'aridité : une contrainte au développement. Col. Didactiques, Ed. ORSTOM, 179-195.

Bille, J.C., 1992b. La réflectance des végétaux : variations et évolution annuelle. L'aridité : une contrainte au développement. Col. Didactiques, Ed. ORSTOM, 167-178.

Chen, J.M. et J. Cihlar, 1996. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images. *Rem. Sens. Env.*, 55:153-162

Dechamps, P.Y., F.M. Bréon, M. Leroy, A. Podaire, A. Bricaud, J.C. Buriez et G. Sèze, 1994. The POLDER mission : Instrument characteristics and scientific objectives, *IEEE Transactions on Geoscience an Remote Sensing*, 32:598-615.

Deering, D. W. et E. M. Middleton, 1990. Spectral bidirectional reflectance and effects on vegetation indices for a prairie grassland. *Preprints of the Symposium on FIFE, First ISLSCP Field Experiment,* American Meteorological Society, Boston, 71-76.

Defourny, P., 1992. Contribution aux méthodes d'évaluation et de suivi par télédétection satellitaire de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne. *Thèse,* Université catholique de Louvain.

Demarez, V., 1997. Modélisation du transfert radiatif et télédétection hyperspectrale pour le suivi temporel de la teneur en chlorophylle d'une forêt tempérée. *Thèse,* Université Paul Sabatier Toulouse III. 142 p.

Dufrêne E., V. Ledantec, V. Demarez, J.P. Gastellu-Etchegorry, G. Marty, E. Mougin, C. Proisy, B. Lacaze, et S. Rambal, 1997. Remote Sensing of the Fontainebleau Forest during Emac-94 : Objectives and Data Collection Program, *Publications ESA.*

Estève, P., J. Fontès et J.P. Gastellu-Etchegorry, 1998. Tropical dry ecosystems modelling and monitoring from space. *Ecological modelling*. vol. 108, n°1-3, 175-188.

Fontès, J. et S. Guinko, 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. *Notice explicative. Ministère de la Coopération Française. Projet Campus* 88 313 101. 67 p.

Fontès, J. P. Estève et J.P Gastellu-Etchegorry, 1997. Validation de résultats de traitement d'images spatiales appliqués à l'étude de la dégradation des écosystèmes ligneux secs du Burkina Faso. Actes des septièmes journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF.

Foody, G.M., D.S. Boyd et P.J. Curran, 1996. Relations between tropical forest biophysical properties and data acquired in AVHRR channels 1-5. *Int. J. Remote Sensing,* vol. 17, n°7, 1341-1355.

Fournier, A., 1987. Cycle saisonnier de la phytomasse et la production herbacée dans les savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes ouest-africaines. Bull. Ecol. t.18,4, 409-430.

Gao, W., et B. M. Lesht, 1997. Model Inversion of Satellite-Measured Reflectances for Obtaining Surface Biophysical an Bidirectional Reflectance Characteristics of Grassland. . *Rem. Sens. Env.,* 59:461-471.

Gastellu Etchegorry, J.P., V. Demarez, V. Pinel, et F. Zagolski, 1996. Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. *Rem. Sens. Env.,* 58:131-156.

Gastellu Etchegorry, J.P., P. Guillevic, F. Zagolski, V. Demarez, V. Trichon, D. Deering et M. Leroy, 1998. Modeling BRF and Radiation Regime of Tropical and Boreal Forests. Part I : BRF. . *Rem. Sens. Env.,* accepté.

Goel, N.S., et D.E. Strebel, 1983. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables, I. Problem definition and initial results using the Suits model. *Rem. Sens. Env.,* 13:487-507.

Goel, N.S., et R.L. Thompson, 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. IV. Total inversion of the SAIL model. *Rem. Sens. Env.*, 15:237-253.

Goel, N.S., 1989. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. Dans *Theory and applications of Optical Remote Sensing.* Ghassem Asrar. Wiley-Interscience New York.

Goevarts, Y., 1995. A model of light scattering in three-dimensional plant canopies : a Monte Carlo ray tracing approach. *Thèse*. Université Catholique de Louvin.

Goita, K. et A. Royer, 1993. Land-surface climatology and land cover change monitoring since 1973 over a north-sahelian zone (Ansongo-Mali) using Landsat data. *Geocarto International*, vol. 8, 15-28.

Goudrian, J., 1977. Crop Micrometeorology : A simulation study. Pudoc, Wageningen.

Hiernaux, P.H.Y. et C.O. Justice, 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le sahel malien. *Int. J. Remote Sensing* vol. 7, no. 11, 1515-1531.

Jacquemoud, S. et F. Baret, 1990. PROSPECT : A model of leaf optical propreties spectra, *Rem. Sens. Env.*, 34:75-91.

Jacquemoud, S., 1993. Inversion of the PROSPECT+SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent Spectra: Theoretical Study. *Rem. Sens. Env.*, 44:281-292.

Justice, C.O., J.R.G. Townshend, B.N. Holben et C.J. Tucker, 1985. Phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, 6, 1271.

Kimes, D.S. et J.A Kirchner, 1982. Radiative transfer model for heterogeneous 3D scenes, Appl. Opt., 21:4119-4129

Kimes, D.S. et R.F Nelson, 1998. Attributes of neural networks for extracting continuous vegetation variables from optical and radar measurements. *Int. J. Remote Sensing*, in press.

Knyazikhin, Y., J.V. Martonchik, R.B. Myneni, D.J. Diner, et S. W. Running, 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J. Geophys. Res.*, numéro spécial EOS-AM1, soumis.

Kubelka, P., et F. Munk, 1931. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Ann. Techn. Phys.* Vol.11,p.593-601.

Kuusk, A., 1991. Determination of Vegetation Canopy Parameters from Optical Measurements. *Rem. Sens. Env.*, 37:207-218.

Kuusk, A., 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Rem. Sens. Env.,* 50:75-82.

Le Houerou, H.N., 1989. The grazing land ecosystems of the African Sahel. Ecological Studies 75, Springer Verlag, 282p.

Li, X. et A.H. Strahler, 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. GE-23:705-721.

Li, X., A.H. Strahler et C.E. Woodcock, 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Transaction on Geoscience Remote Sensing.* Vol. 30, p276-292.

Malingreau, J.P. et C.J. Tucker, 1988. Large-scale deforestation in the southeastern Amazone basin of Brazil. *Ambio*, 17:49-55.

Malingreau, J.P., C.J. Tucker et N. Laporte, 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *Int. J. Remote Sensing* 10, 855-867.

Malingreau, J.P., D. Ehrlich et E.F. Lambin, 1996. Are detectable discrete boundaries between African biomes. *Int. J. Remote Sensing*, vol.17, n°5, 841-844.

Menaut, J.C., 1983. The vegetation of African savannas. Dans Tropical savannas, Bourlière F.(Ed), 109-149. Amsterdam, Elsevier, 730p.

Miquel, C., 1993. Etude de la désertification au Burkina Faso par Télédétection. Mémoire de DESS, Univ. P. Sabatier, Toulouse, 36p. + annexes.

Myneni, R.B., A. Marshak, Y. Knyazikhin et G. Asrar, 1991. Discrete ordinates method for photo transport in leaf canopies. *Photon-vegetation Interaction*. R.B. Myneni and J. Ross Eds., p. 45-109.

Nelder, J.A., et R. Mead, 1965. *Computer Journal*, 7:308

Nilson, T. et A. Kuusk, 1989. A Reflectance Model for the Homogeneous Plant Canopy and its Inversion. *Rem. Sens. Env.,* 27:157-167.

Pinel, V., 1997. Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection. *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse III. 254 p.

Powell, M.J.D., 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal* 7:155-162.

Privette, J.L., W.J. Emery et D.S. Schimel, 1996. Inversion of a Vegetation Reflectance Model with NOAA AVHRR Data. *Rem. Sens. Env.,* 58, 187-200.

Rondeaux, G., M. Steven et F. Baret, 1996. Optimization of soils-adjusted vegetation indices. *Rem. Sens. Env.,* 55, 95-107.

Rosema, A., W. Verhoef, H. Noorbergen et J.J. Borgesius, 1992. A New Forest Light Interaction Model in Support of Forest Monitoring. *Rem. Sens. Env.,* 42:23-41.

Royer, A., M. Yergeau, J. Fontès, G. Flouzat, et J.M. Ouadba, 1994. Analyse de l'évolution de la désertification au sahel par satellites, Réseau de télédétection de l'AUPELF/UREF, Programme de recherche partagée, Rapport final, Sherbrooke, 9p.

Sellers, P.J., F.G. Hall, H. Margolis, B. Kelly, D. Baldocchi, J. Den Hartog, J. Cihlar, M. Ryan, B. Goodison, P. Crill, J. Ranson, et D. Lettenmaïer, 1995. The Boreal Atmosphere Study (BOREAS) : an overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of American Meterology Society,* Sept 1995.

Serpantié, G., L. Tezenas du Moncel et C. Valentin, 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. L'aridité : une contrainte au développement. Col. Didactiques, Ed. ORSTOM, 419-447.

Suits, G.H., 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Rem. Sens. Env.,* 2:113-129.

Townshend, J.R.G. et C.O. Justice, 1986. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sensing* 7, 1435-1445.

Tucker, C.J. et P.J. Sellers, 1986a. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sensing* 7, 1395-1416.

Tucker, C.J. et S.D. Prince, 1986b. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *Int. J. Remote Sensing* 7, 1571-1581.

Vanderbilt V.C., L. Grant et Ustin, 1991. Polarization of light by vegetation. *Photon-vegetation Interactions*, R.B. Myneni and J. Ross Eds., 191-228.

Vermote, E., D. Tanré, L. Deuze, N. Herman et J.J. Morcrette, 1996. Second simulation o0.f satellite signal in the solar spectrum (6S), *6S user's guide*, Version 1, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France, 214p.

Verhoef, W., 1981. Light scattering by leaf layer with application to canopy reflectance modeling : The SAIL model. . *Rem. Sens. Env.,* 16:125-141.

Zagolski, F. et J.P. Gastellu-Etchegorry, 1995. Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model. *Int. J. Remote Sensing* 16, 3115-3146.