

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**Par
Dave DIONNE**

**L'IMPORTANCE DE LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE
D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION POUR LA DISCRIMINATION
DES PEUPELEMENTS FORESTIERS EN MILIEU MONTAGNEUX.**

Juillet 1997

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

L'objectif principal de cette étude était d'appliquer l'approche de la résolution spatiale optimale développée par Marceau *et al.* (1994b) dans un environnement complexe tel un milieu forestier montagneux. Les objectifs spécifiques, quant à eux, sont: 1) de procéder à l'identification de la résolution spatiale optimale pour chaque type de peuplement forestier, en terrain de faible inclinaison comme en terrain pentu 2) de vérifier l'utilité des paramètres topographiques (pente et exposition) dans la définition des entités géographiques d'intérêt et 3) d'identifier les canaux permettant la séparabilité spectrale maximale interclasse.

Les données multispectrales numériques à haute résolution utilisées ont été acquises par le capteur à barrette *push-broom* RAMI à 1,67 m de résolution en 3 bandes spectrales homologues de SPOT HRV (vert, rouge et proche infrarouge), au dessus d'un secteur de 13 x 3,5 km dans les Monts de Lacaune (Tarn, France). La méthode proposée consiste à 1) définir les entités géographiques d'intérêt (objets étudiés) en incluant les facteurs topographiques (pente et exposition) dans leur définition, 2) déterminer un critère d'optimisation, dans cette étude il s'agit de la variance spectrale minimale, 3) agréger spatialement les données acquises à très haute résolution 4) appliquer le critère d'optimisation aux données agrégées 5) valider les résultats obtenus à l'aide de l'analyse de la séparabilité spectrale.

Pour l'ensemble des classes forestières, nous retrouvons une résolution spatiale optimale et celle-ci varie de 8,3 à 28,3 m. Par ailleurs, les résultats de cette recherche nous révèlent que, premièrement, il y a une diminution sensible de la résolution spatiale optimale des peuplements se situant en terrain pentu (20-30%) par rapport à ceux se situant en terrain de faible inclinaison (0-10%). Deuxièmement, nous constatons qu'en fonction de l'exposition solaire du versant, le peuplement peut présenter des changements aux niveaux spectral et spatial. Nous suggérons donc, à la lumière des résultats obtenus, que pour un peuplement forestier présentant *a priori* les mêmes caractéristiques structurales, si celui-ci se trouve en situation de topographie accidentée, nous devons inclure de nouveaux paramètres topographiques dans sa définition pour parler désormais d'une autre entité géographique. Les résultats démontrent également que la bande spectrale du proche infrarouge favorise de façon plus importante la discrimination des peuplements forestiers par rapport aux bandes du vert et du rouge. En améliorant ainsi la définition des entités géographiques et en choisissant la résolution spatiale optimale, la détection et la discrimination des peuplements forestiers devraient s'avérer maximale lors de la classification des images numériques de télédétection.

Abstract

The prime objective of this study was to apply the method identifying the optimal spatial resolution developed by Marceau *et al.* (1994b) in a complex environment such as a mountainous forest land. The specific objectives were 1) to proceed at the identification of optimal spatial resolution for every forest stand under investigation in flat as well as steep surfaces, 2) to verify the utility of topographic parameters (slope and aspect) in the definition of forest stands of interest and 3) to identify the spectral channels that allow a maximum inter-class discrimination. The high resolution remote sensing data used for this study were acquired during a SPOT-5 airborne simulation with the RAMI *push-broom* sensor (green, red and near infrared) at 1.67m spatial resolution over an area of 13 X 3.5 km in the Monts de Lacaune (Tarn, France). The method proposed consist 1) to define the geographic entity of interest (forest stands) by including topographic parameters in their definition, 2) to determine an optimization criterion (which is the minimum spectral variance in this study), 3) to aggregate the remotely sensed data acquired at high resolution, 4) to apply the optimization criterion to the aggregated data and 5) to validate the results with profile of spectral separability and multivariate analysis.

For all forest classes under investigation, we find an optimal spatial resolution ranging from 8,3 à 28,3 m. Furthermore, this study showed that the optimal spatial resolution decreases when a forest stand is located on steep surfaces (slope 20-30%) comparing to the same forest located on flat surface (slope 0-10%). Secondly, we observed that slope was more important than aspect in controlling spatial and spectral properties. Based on the results obtained in this study, we suggest that for a forest stand presenting *a priori* the same structural properties, if this one is located on steep surface (slope 30% and higher), it is recommended to include topographic parameters, to take it as a different entity. The results also demonstrated that the near infrared channel favored spectral separability between forest class compared to the green and red channels. Finally, by improving the definition of geographic entities and by choosing the optimal spatial resolution, the detection and discrimination of forest stands should give more accurate results when classifying remotely sensed images.

Avant-propos

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'une coopération scientifique et technologique franco-qubécoise impliquant le département de Géographie de l'Université de Montréal, la section de Géographie et des Sciences de l'Environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), le Groupement Scientifique de Télédétection spatiale de Strasbourg (GSTS), le Laboratoire Commun de Télédétection du CEMAGREF-ENGREF et l'Inventaire Forestier National (IFN) de France.

L'objectif poursuivi par cette coopération est de mettre au point de nouvelles méthodes pour l'inventaire et la mise à jour cartographique des types de peuplements forestiers à l'aide de la télédétection basée sur la multi-résolution spatiale. Ainsi la présente étude consiste à établir une relation entre les résolutions spatiales de données de télédétection et les propriétés spatiales et spectrales des différents peuplements forestiers. Cette collaboration entre les divers intervenants a également pour objectif essentiel d'obtenir des résultats appliqués concernant l'analyse spatiale des peuplements forestiers, notamment sur les sites tests de Petawawa au Canada, du Réal Collobrier et des Monts de Lacaune en France. L'apprentissage et le développement de nouvelles méthodologies sont également nécessaires à la caractérisation des espèces forestières ou de leur stade d'évolution. Il est également prévu que l'intégration des méthodes élaborées par les différents partenaires aura pour effet d'accroître la fiabilité de la cartographie produite à l'aide de la télédétection.

Enfin, la collaboration consiste à développer un algorithme de classification hiérarchisée pour la cartographie des peuplements forestiers qui intègre la relation entre l'hétérogénéité spatiale des peuplements et la taille de la maille d'échantillonnage des données de télédétection.

Remerciements

À la suite de ces deux dernières années de travail ponctuées de réussites et d'embûches, je ne peux passer sous silence ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à mener terme cette entreprise.

J'aimerais transmettre mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche Denis Gratton, professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, ainsi qu'à ma co-directrice Danielle Marceau, professeure à l'Université de Montréal.

Mes remerciements les plus distingués vont également à mes deux maîtres de stage soient MM. Michel Deshayes du Laboratoire Commun de Télédétection (LCT) de Montpellier, France et Jean-Guy Boureau de l'Inventaire Forestier National, échelon de Montpellier, France. Par le fait même, j'aimerais remercier M. Gilles Lechapt, directeur du LCT, afin de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et d'y avoir facilité mon séjour.

Un merci particulier à l'endroit du Centre National d'Étude Spatial français (CNES) pour m'avoir permis de travailler sur des données de qualité et à Mme Colette Defer du département des recherches forestières de l'INRA pour la gestion de ma bourse.

Ici, j'aimerais remercier ceux qui, sans le savoir, m'ont rendu service à leur manière. Dans l'ordre: Laurent Albrecht, André Beaudoin, Thierry Castel, Martin Cossette, Kilani Ghoudi, Sylvain Labbé, Denis Leroux, Alain Morissette, Christian Puech, Nicolas Stach, Nicolas Stussi et Pascal Vinné.

Enfin, un merci spécial à Anne-Michèle pour son aide et son soutien.

RÉSUMÉ.....	I
ABSTRACT	II
AVANT-PROPOS	III
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	X
CHAPITRE I INTRODUCTION	2
1.1 LES DOMAINES D'APPLICATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION EN FORESTERIE.....	2
1.2 LA RÉFLECTANCE DES COUVERTS VÉGÉTAUX	4
1.3 LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'INVENTAIRE FORESTIER ET LA MISE À JOUR DES DONNÉES.....	5
1.4 L'ANALYSE DES DONNÉES DES IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION	7
1.5 L'ACQUISITION D'IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION.....	8
1.5.1 <i>Caractéristiques des images de télédétection.....</i>	9
1.5.2 <i>Les problèmes inhérents à la résolution spatiale des images.....</i>	11
1.6 LA DÉFINITION DES ENTITÉS GÉOGRAPHIQUES D'INTÉRÊT.....	16
1.6.1 <i>La définition des objets et des thèmes</i>	16
1.6.2 <i>Les paramètres topographiques et les entités géographiques</i>	19
1.7 L'APPROCHE DE LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE.....	21
1.8 LES OBJECTIFS DE CE MÉMOIRE.....	23
CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES UTILISÉES.....	25
2.1 LA PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	25
2.1.1 <i>Description générale.....</i>	25
2.1.2 <i>La végétation forestière.....</i>	26
2.2 LA DESCRIPTION DES DONNÉES AÉROPORTÉES.....	28
2.2.1 <i>Les caractéristiques du capteur.....</i>	28
2.2.2 <i>Les paramètres d'acquisition.....</i>	29
2.2.3 <i>Les corrections géométriques.....</i>	30
2.3 LA DESCRIPTION DES DONNÉES DE TERRAIN.....	31
2.3.1 <i>Le modèle numérique de terrain (MNT)</i>	31
2.3.2 <i>La couverture forestière numérisée</i>	31
2.3.3 <i>Les relevés de terrain</i>	32
2.3.4 <i>Les autres données utilisées.....</i>	33
CHAPITRE III APPLICATION DE LA MÉTHODE DE LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE	35
3.1 LA DÉFINITION DES ENTITÉS GÉOGRAPHIQUES D'INTÉRÊT	35
3.1.1 <i>La nomenclature de l'Inventaire Forestier National.....</i>	36
3.1.2 <i>Les niveaux d'agrégation retenus</i>	37
3.1.3 <i>La modélisation de la topographie.....</i>	38
3.1.4 <i>Les peuplements forestiers à l'étude</i>	40
3.2 LA SÉLECTION DU CRITÈRE D'OPTIMISATION.....	41

3.3 L'AGRÉGATION PROGRESSIVE DES DONNÉES	42
3.3.1 <i>Le processus d'agrégation des données</i>	42
3.3.2 <i>La présentation de l'algorithme</i>	42
3.4 L'APPLICATION DU CRITÈRE D'OPTIMISATION SUR LES SÉRIES DE DONNÉES AGRÉGÉES	43
3.5 LA VALIDATION DES RÉSULTATS.....	44
3.5.1 <i>L'analyse de variance bivariée par paires de classe</i>	44
3.5.2 <i>L'analyse de variance bivariée pour chaque classe par rapport à l'ensemble des classes</i>	45
CHAPITRE IV RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	47
4.1 INTERPRÉTATION DES COURBES DE VARIANCE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE POUR LA DÉTECTION DES CLASSES FORESTIÈRES	47
4.1.1 <i>L'influence des paramètres forestiers</i>	48
4.1.2 <i>L'influence des paramètres topographiques</i>	50
4.2 LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE ET LA DISCRIMINATION DES CLASSES FORESTIÈRES	58
4.2.1 <i>La séparabilité spectrale entre paires de classes</i>	58
4.2.2 <i>La séparabilité spectrale de chaque classe par rapport à l'ensemble des classes</i>	69
CHAPITRE V CONCLUSION	75
RÉFÉRENCES	81
ANNEXE 1 LES STRUCTURES FORESTIÈRES.....	87
ANNEXE 2 LE PROGRAMME SUR LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE (AML)	88
ANNEXE 3 LE PROGRAMME SPSS SUR L'ANALYSE DE VARLANCE (SPSS).....	91

Liste des figures

FIGURE 1.1 LES BESOINS D'INFORMATION FORESTIÈRE D'UN POINT DE VUE HIÉRARCHIQUE.....	3
FIGURE 1.2 LES ÉTAPES D'OPÉRATION POUR L'ANALYSE DES IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION.	8
FIGURE 2.1 LA ZONE D'ÉTUDE DES MONTS DE LACAUNE (TARN, FRANCE)	25
FIGURE 2.2 RÉPARTITION DES PEUPELEMENTS FORESTIERS SUR LA ZONE D'ÉTUDE DES MONTS DE LACAUNE (ADAPTÉ DE DURRIEU ET DESHAYES, 1994)	27
FIGURE 2.3 IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE ACQUISE AU-DESSUS DU TRANSECT DES MONTS DE LACAUNE. ..	29
FIGURE 2.4. ANGLES ZÉNITHAL ET AZIMUTAL SOLAIRES LORS DE L'ACQUISITION	30
FIGURE 3.1. NIVEAU D'AGRÉGATION SELON LA NOMENCLATURE DE L'IFN (SUR LE TRANSECT DES MONTS DE LACAUNE, TARN)	38
FIGURE 3.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'OBTENTION DE CLASSES HOMOGÈNES.....	39
FIGURE 3.3 L'ALGORITHME D'AGRÉGATION SPATIAL DE DONNÉES MULTISPECTRALES.....	43
FIGURE 4.1 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 1, ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	52
FIGURE 4.2 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 2 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	53
FIGURE 4.3 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 3 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	54
FIGURE 4.4 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 4 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	55
FIGURE 4.5 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 5 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	56
FIGURE 4.6 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 6 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	56
FIGURE 4.7 VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 7 ET VOISINAGE DE PIXELS CORRESPONDANT À LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE DÉLIMITÉ SUR UN SITE REPRÉSENTATIF POUR CHAQUE TYPE D'EXPOSITION SOLAIRE	57
FIGURE 4.8 LÉGENDE DES GRAPHIQUES PORTANT SUR LA VARIANCE SPECTRALE EN FONCTION DE LA RÉOLUTION SPATIALE.....	57
FIGURE 4.9 PROFILS DE LA SÉPARABILITÉ SPECTRALE POUR LES CLASSES 1 À 4.....	71
FIGURE 4.10 PROFILS DE LA SÉPARABILITÉ SPECTRALE POUR LES CLASSES 5A À 6B.....	72
FIGURE 4.11 PROFILS DE LA SÉPARABILITÉ SPECTRALE POUR LES CLASSES 7A ET 7B.....	73

Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 CARACTÉRISTIQUES DU CAPTEUR AÉROPORTÉ MULTISPECTRAL	28
TABLEAU 3.1 LES PEUPELEMENTS FORESTIERS À L'ÉTUDE.....	41
TABLEAU 4.1 CLASSES FORESTIÈRES ET RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE	48
TABLEAU 4.2. VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 1A.....	60
TABLEAU 4.3 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 1B.....	60
TABLEAU 4.4 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 1C.....	61
TABLEAU 4.5 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 2A.....	61
TABLEAU 4.6 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 2B.....	62
TABLEAU 4.7 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 2C.....	62
TABLEAU 4.8 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 3A.....	63
TABLEAU 4.9 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 3B.....	63
TABLEAU 4.10 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 3C.....	64
TABLEAU 4.11 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 4A.....	64
TABLEAU 4.12 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 4B.....	65
TABLEAU 4.13 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 4C.....	65
TABLEAU 4.14 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 5A.....	66
TABLEAU 4.15 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 5B.....	66
TABLEAU 4.16 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 6A.....	67

TABLEAU 4.17 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 6B.....	67
TABLEAU 4.18 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 7A.....	68
TABLEAU 4.19 VALEURS DE F OBTENUES À PARTIR DU TEST DE VARIANCE BIVARIÉE APPLIQUÉ AUX 3 BANDES SPECTRALES DE L'IMAGE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE POUR LA CLASSE FORESTIÈRE 7B.....	68

Liste des abréviations

- AVHRR:** *Advanced Very High Resolution Radiometer*
- CCD:** *Charged Couple Device* (Détecteur à transfert de charge)
- CNES:** Centre National d'Etude Spatiale (France)
- HRV:** Haute Résolution Visible
- IFN:** Inventaire Forestier National (France)
- IFOV:** *Instantaneous Field Of View* (Champs utile instantanée)
- IGN:** Institut Géographique National (France)
- Landsat:** *Land Satellite*
- MSS:** *Multi Spectral Scanner*
- MEIS:** *Multi-detector Electro-optical Imaging System*
- NDVI:** *Normalized difference vegetation index*
- NOAA:** *National Oceanographic and Atmospheric Administration*
- ONF:** Office National des Forêts (France)
- SIG:** Système d'Information Géographique
- SPOT:** Satellite Pour l'Observation de la Terre
- TM:** *Land Satellite Thematic Mapper*

Chapitre 1

INTRODUCTION

INTRODUCTION

1.1 Les domaines d'applications de la télédétection en foresterie

Dans le contexte où la demande d'informations géographiques via de nouvelles sciences se fait de plus en plus sentir, la télédétection, par son potentiel d'acquisition sur de très grandes surfaces terrestres et ses horaires de passage répétitif, s'avère très intéressante. De plus, parce qu'elle étudie des objets sans cesse en changement dans le temps et dans l'espace, elle offre des possibilités d'applications avantageuses dans un nombre croissant de domaines (Bonn et Rochon, 1992). En ce qui concerne l'étude de la végétation, la télédétection peut en effet être très utile pour la classification et la cartographie des couverts végétaux, pour l'estimation de la biomasse et du volume sur pied, ou encore pour l'identification des cultures et des rendements. Ici, nous nous attarderons plus précisément aux domaines d'applications de la télédétection en foresterie.

L'étude de la forêt, en raison de ses trois principaux rôles soit la protection (faune, biodiversité), la production (pâtes et papiers, bois de construction, de chauffage) et la récréation (observation, plein air), a longtemps nécessité des informations à caractère spatial. Encore aujourd'hui, de nouveaux besoins en informations se font sentir, notamment pour les événements catastrophiques tels les incendies forestiers ou encore pour les dépérissements dus à diverses causes environnementales (Figure 1.2). En conséquence, nous avons assisté ces dernières années au développement de méthodes d'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection spatiale en foresterie.

- **Cartographie de reconnaissance**
 - Pré-inventaire et stratification
 - Cartographie thématique
 - Ecosystème et habitat faunique
 - Carte des essences forestières
- **Inventaire forestier détaillé**
 - Forêt
 - Limites des peuplements
 - Caractéristiques des peuplements
 - Composition
 - Hauteur de classe
 - Age
 - Densité
 - Non-Forêt (agricole, tourbière, eau, roche)
- **Changements forestiers (mise à jour de l'inventaire)**
 - Pertes
 - Limites de coupes forestières
 - Détection des dommages par les insectes
 - Autres (orages, inondations, maladies)
 - Additions
 - Régénération naturelle
 - Plantations
- **Protection de la forêt**
 - Protection contre le feu
 - Prédiction des feux par les types d'essences
 - Détection des feux
 - Cartographie des dommages
 - Attaques par les insectes
 - Populations
 - Efficacité des insecticides

Figure 1.1 Les besoins d'information forestière d'un point de vue hiérarchique
(adapté de Ahern et Leckie, 1987)

La forêt et les surfaces boisées couvrent approximativement 40% de la surface globale des continents (Lieth, 1975). En terme de ressource naturelle, les produits dérivés de la forêt sont évalués à plusieurs milliards de dollars à travers le monde. Ces statistiques

impressionnantes démontrent les avantages géographiques et économiques à appliquer les méthodes de télédétection en foresterie (Peterson et Running, 1989). Les informations qu'elle offre sont indispensables pour la gestion, le processus de prise de décision, pour les études de faisabilité, dans les projets de développement ainsi que dans plusieurs travaux d'ingénierie (Lo, 1986).

La télédétection des ressources forestières requiert une grande variété de résolutions spatiales afin de couvrir un large éventail de problèmes (Lintz et Simonett, 1976). La principale application de la télédétection en foresterie consiste à inventorier la ressource en exécutant des classifications d'images numériques menant à la cartographie des peuplements forestiers. Ultérieurement dans ce même chapitre, nous reviendrons plus en détail sur ce sujet. Par ailleurs, certaines applications plus spécifiques consistent à estimer le volume sur pied ou à évaluer la sensibilité vis-à-vis des feux de forêt, des maladies, des insectes ou de la pollution. Finalement, la télédétection peut s'avérer également très utile, entre autre, pour estimer certains indices de végétation qui nous donne le rapport entre la surface des feuilles et la surface de sol occupée par la végétation ou qui, à partir des valeurs spectrales, mesure la biomasse et la vigueur de la végétation.

1.2 La réflectance des couverts végétaux

La télédétection utilise les propriétés optiques des objets observés pour acquérir de l'information sur les caractéristiques physiques et biologiques de ces derniers (Bonn et Rochon, 1992). L'information provient des ondes électromagnétiques émises par le soleil qui vont rencontrer la matière et par la suite être enregistrées par un capteur et traduites sous forme d'image numérique. Or ces caractéristiques spectrales ne peuvent expliquer complètement à elles seules la réflectance d'un couvert végétal occupant une aire géographique. En effet, l'architecture du couvert est composée de feuilles, de

branches et de troncs qui varient en taille, en orientation et en forme, sans compter les variations de la strate arbustive et herbacée au niveau du sous-bois (Campbell, 1987).

La distribution spatiale de la végétation à la surface s'avère donc d'une grande importance; au fur et à mesure que celle-ci va croître, la proportion de surface de sol occupée par la végétation sera plus grande (Goel, 1989). De plus, un couvert forestier est composé de plusieurs couches de feuilles. La réflectance totale du couvert sera ainsi une combinaison de la réflectance des feuilles supérieures et de l'ombre créée par ces dernières sur les feuilles inférieures et sur le sous-bois (Campbell, 1987). Le niveau d'ombrage présent sur une image dépend de plusieurs facteurs tels la position de la source d'illumination (angle azimutal et zénithal solaire), le type de végétaux (forme et orientation des feuilles, structure morphologique) et également de la topographie de la surface (pente et orientation). L'ombre créée par ces caractéristiques spatiales a tendance à diminuer la réflectance du couvert en deçà de la valeur normale d'une feuille seule. Il est donc très important de bien cerner tous ces paramètres spatiaux lorsque nous entreprenons l'étude de la végétation avec des données de télédétection.

1.3 La télédétection pour l'inventaire forestier et la mise à jour des données

Comme pour toute autre ressource naturelle, il s'avère essentiel de réaliser un inventaire de la forêt afin d'acquérir des informations sur la quantité, la qualité et la distribution de cette ressource pour mieux la gérer et l'utiliser. Les inventaires forestiers traditionnels sont produits à partir de photo-interprétations de couvertures aériennes spécifiques et de relevés de terrain afin de produire un certain nombre d'informations forestières statistiques et cartographiques pour le compte des gouvernements, des producteurs et des gestionnaires de la forêt. Mais ces informations sont souvent réalisées au cours d'un cycle décennal, ce qui se traduit par la publication annuelle de résultats sur environ un dixième du territoire seulement. Entre deux campagnes de relevés, les données ne sont pas actualisées alors que le besoin d'une mise à jour intermédiaire commence à se faire

sentir. La télédétection satellitale pourrait être utile à cette tâche (Durrieu et Deshayes, 1994).

En outre, d'autres besoins d'informations sur les forêts ne sont pas satisfaits, dans le contexte où la demande sociale est plus forte et les enjeux de société plus complexes et plus pressants mais où les budgets alloués sont de plus en plus restreints (Hudson, 1987). De plus, parce que les ressources forestières varient dans le temps à cause de la croissance de la végétation, des coupes forestières, des feux de forêt ou des variations de la qualité, l'inventaire se veut non seulement une tâche première mais également une tâche périodique (Hilborn, 1978). Là aussi, les données de télédétection doivent être évaluées pour leur apport éventuel.

Les images numériques de télédétection offrent donc plusieurs avantages. D'abord le passage répétitif des satellites permet d'obtenir régulièrement des informations sur la forêt, offrant ainsi l'opportunité d'effectuer des suivis de la ressource. De plus, sans toutefois remplacer les relevés et les mesures de terrain, les classifications d'images permettent une délimitation rapide et assez précise des grandes unités de végétation (Campbell, 1987). En effet, depuis l'avènement du satellite multispectral Landsat (MSS) en 1972, les classifications d'images numériques de télédétection ont connu une expansion rapide pour la détection et la modélisation des entités géographiques d'intérêt (Marceau, 1992).

Étant rapidement perçu comme un outil d'acquisition des plus puissants, la détection et la discrimination par des méthodes basées sur les signatures multispectrales des objets ont été appliquées dans un grand nombre de domaines (Marceau, 1992). Cependant, malgré les avancements technologiques, notamment au niveau des capteurs et des algorithmes de classification d'images de télédétection, l'exactitude des résultats fournis jusqu'à maintenant ne rencontre pas toujours les exigences des gestionnaires de la forêt.

1.4 L'analyse des données des images de télédétection

En observant les résultats de classification d'images de télédétection obtenus avec les différentes méthodes jusqu'à maintenant, nous arrivons à la constatation majeure suivante: pour un environnement forestier donné, le niveau d'erreur d'une classe à l'autre peut être considérablement élevé (Marceau, 1992). En effet, les capteurs satellitaires ne sont pas en mesure d'effectuer une cartographie qui réponde aux critères de l'inventaire forestier à grande échelle. Plusieurs études ayant pour but la classification des espèces à l'aide d'images satellitaires ont montré successivement que les satellites Landsat MSS, TM et SPOT ne pouvaient donner que des informations trop générales sur les espèces et, par le même fait, être peu utiles dans le processus d'inventaire forestier (Cihlar, 1986; Ahern et Leckie, 1987).

Dans un contexte d'analyse de données de télédétection, l'extraction d'informations a une signification particulière. C'est la procédure par laquelle nous isolons les éléments statistiques dans l'espace multispectral afin de tracer le portrait des objets d'intérêt présents sur l'image (Campbell, 1987). L'analyse des images numériques de télédétection, en fonction des hypothèses de recherche ou des objectifs d'étude, peut être exécutée par différentes méthodes, chaque étude comportant toutefois des points communs. Toute étude de télédétection implique l'exécution d'au moins trois ensembles d'opérations liées les unes aux autres. Ces ensembles d'opération sont les suivantes:

- a** - l'acquisition de données de télédétection et des autres données complémentaires et la définition des entités géographiques d'intérêt,
- b** - le traitement et l'analyse des données en vue de faire l'extraction des informations pertinentes à l'étude,
- c** - et la présentation des informations sous forme de cartes thématiques ou l'intégration de celles-ci dans une base de données ou un SIG.

À chacune de ces ensembles d'opérations sont reliées des choix très importants qui ne sont pas suffisamment approfondis dans la plupart des études. En résumé, nous retrouvons de façon schématisée à la Figure 2.1 les différentes étapes d'opération ainsi que le choix que doit réaliser le chercheur afin d'obtenir les meilleurs résultats de classification possibles. Notons qu'ici le choix des bandes spectrales et de la période d'acquisition ne figurent mais sont aussi important.

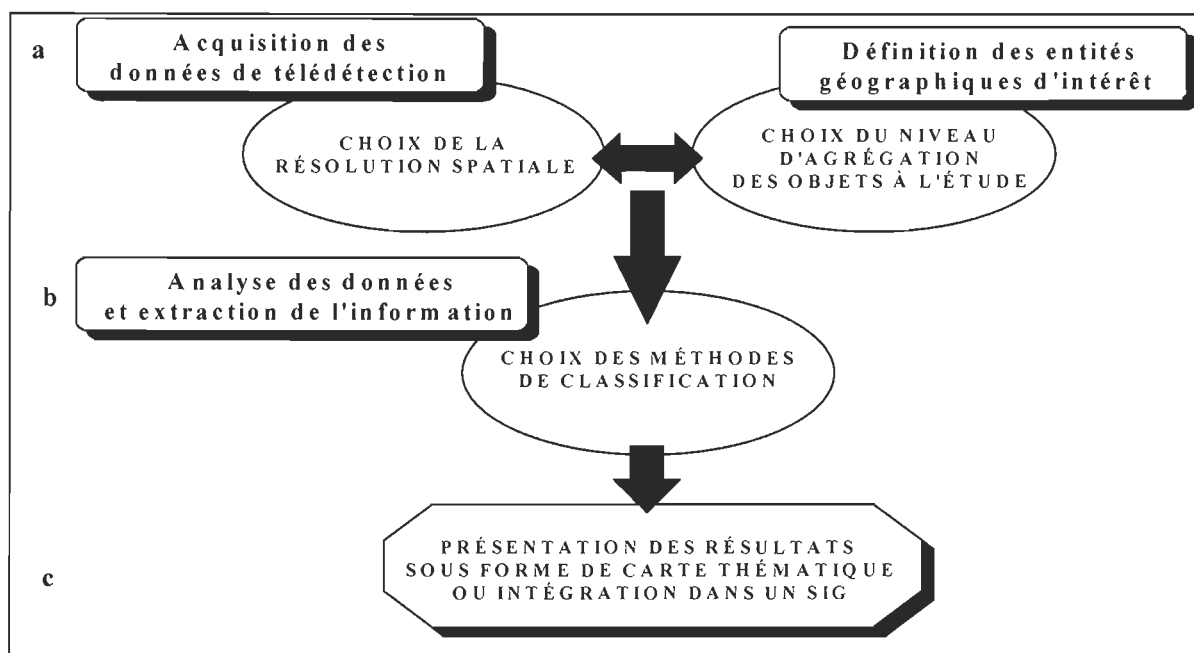


Figure 1.2 Les étapes d'opération pour l'analyse des images de télédétection.

1.5 L'acquisition d'images de télédétection

Comme pour les sources d'archives spatiales telles les cartes topographiques, thématiques et autres, les images numériques de télédétection sont un modèle qui n'est pas tout à fait une représentation réelle du monde. En effet, elles ne représentent pas un portrait complet de tous les phénomènes à la surface de la terre, mais plutôt une grille d'échantillonnage à partir de laquelle des mesures électromagnétiques de la surface sont acquises et par la suite analysées et traduites en informations significatives (Marceau, 1992). Les caractéristiques des images numériques de télédétection seront détaillées au point suivant. Le modèle d'acquisition qui est une simplification et une approximation

de la réalité, représente la structure de base pour la définition, les mesures et la cueillette des données sur une aire géographique à l'étude (Harvey, 1969).

Afin de décrire une scène géographique avec un niveau de précision satisfaisant pour les utilisateurs, le modèle d'acquisition a pour but d'offrir la meilleure structure de connaissance. Marceau (1992) mentionne que la force du modèle d'acquisition repose sur les questions fondamentales suivantes:

- 1) Comment sont définis les objets à l'étude?
- 2) Jusqu'où le modèle donne une représentation proéminente de ces objets?
- 3) Est-ce que l'échelle de mesure est appropriée pour les objets à l'étude?
- 4) Comment les caractéristiques de la grille d'échantillonnage peuvent affecter la qualité des mesures et par conséquent leur potentiel d'interprétation?

Partant du principe que les modèles sont une approximation ou une représentation partielle de la réalité, plusieurs présomptions peuvent être soulevées concernant le schéma expérimental pendant l'application du modèle. Les présomptions relatives au modèle d'acquisition utilisé en télédétection peuvent être subdivisées en deux catégories principales. La première catégorie regroupe les présomptions concernant la théorie du comportement des ondes électromagnétiques avec la matière; tandis que la seconde, concerne le système d'acquisition même des données de télédétection (Duggin et Robinove, 1990).

1.5.1 Caractéristiques des images de télédétection

L'avantage des images de télédétection, contrairement aux autres sources d'archives à caractère spatial, est d'offrir des informations biophysiques sur les objets occupant la surface de la Terre. En fait, ce sont des fonctions discrètes bidimensionnelles définissant la juxtaposition d'échantillons spectraux $f_x(i,j,...)$, car mis à part les capteurs

aéroportés à très hautes résolutions (10 m et moins), les capteurs de télédétection ne nous permettent généralement pas de repérer la forme et l'organisation géographique des objets présents dans l'image. Ce sont également des grilles d'échantillonnages fixes appliquées sur une aire géographique donnée. L'intégration des ondes électromagnétiques émises et réfléchies par les objets contenus à l'intérieur de cette maille va constituer la mesure d'un pixel. L'ensemble des pixels organisés sous forme matricielle constituera, quant à lui, l'image numérique.

Finalement, les images sont une généralisation de l'aire géographique au-dessus de laquelle elles sont acquises (Marceau, 1992). En effet, les informations ne nous sont pas présentées directement dans l'image, ce qui nous empêche d'identifier directement les objets constituant la scène. Celles-ci sont plutôt codées en différentes variations de niveaux de gris et de textures que nous devons décoder et interpréter afin d'extraire de l'image brute les informations pertinentes à l'étude (Campbell, 1987).

Une image numérique de télédétection peut donc être conceptualisée comme étant une couverture synoptique d'une aire géographique avec une grande variété de résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle. La résolution spatiale est fonction du champ utile instantané du capteur (IFOV), du contraste entre les cibles et du gain du capteur. Même si plusieurs définitions de la résolution spatiale ont été proposées, elle est référée généralement à la surface vue au sol à un moment donné par le système de balayage du capteur en fonction de l'angle du champ total et de l'altitude de ce dernier. Les problèmes associés à la résolution spatiale seront examinés en profondeur au point suivant. Pour ce qui est de la résolution spectrale, il s'agit des intervalles d'ondes électromagnétiques, appelés bandes spectrales, à l'intérieur desquels on mesure et enregistre le rayonnement émis et réfléchi par les objets composant la surface. Par exemple, un capteur ayant une plus haute résolution spectrale est celui dont les bandes spectrales sont plus étroitement définies et plus nombreuses, permettant ainsi aux

chercheurs d'extraire de l'information plus spécifique sur les objets d'étude. La résolution radiométrique concerne, elle, le processus de codification de l'image en différentes valeurs de gris à partir des signaux enregistrés par le capteur. Ainsi, un capteur avec une résolution radiométrique grossière enregistre une image avec seulement quelques niveaux de gris, donc avec plus de contraste, alors que celui avec une haute résolution radiométrique enregistre la même image avec plusieurs niveaux de gris mais moins de contraste. Quant à la résolution temporelle, il s'agit de l'intervalle de temps entre lequel deux mesures successives sont acquises au-dessus d'une aire géographique donnée (Campbell, 1987).

1.5.2 Les problèmes inhérents à la résolution spatiale des images

Une des caractéristiques fondamentales des images de télédétection est la résolution spatiale ou la taille de la maille correspondant à un pixel à la surface du sol à partir de laquelle les mesures sont enregistrées et comprises dans une image (Townshend, 1980). Estes et Simonett (1975) définissent la résolution comme étant la capacité d'un système ou d'un capteur de télédétection d'enregistrer et d'afficher des détails fins de manière distinctive. En ce sens, la résolution spatiale d'une image est analogue à l'échelle d'observation (Woodcock et Strahler, 1987). Une amélioration des connaissances sur la résolution spatiale est donc essentielle pour mieux comprendre les aspects pratiques et conceptuels de la télédétection (Campbell, 1987).

Sachant que la résolution spatiale influence fortement la qualité des conclusions que l'on peut tracer (Everett and Simonett, 1976), le problème de sélection de l'échelle de mesure appropriée, quoique très complexe, s'avère décisif à toute étude en télédétection. En effet, le choix de l'échelle de mesure ou de la résolution spatiale appropriée est fonction du type d'environnement étudié et des techniques et méthodes d'extraction d'informations choisies (Woodcock et Strahler, 1987). La littérature nous montre que, durant le développement de nombreuses théories sur le comportement spectral des

objets, très peu de travaux ont été réalisés concernant la mesure des structures spatiales et les variations de l'environnement au-dessus duquel les images de télédétection sont acquises. Cependant, quelques auteurs (Simonett et Coiner 1971; Thomson *et al.*, 1974; Morganstern *et al.* 1976; Sadowski et Sarno 1976; Labovitz *et al.* 1980; Latty et Hoffer 1981; Markham et Townshend 1981) se sont penchés sur le problème de la résolution spatiale en télédétection. Une des recherches clefs portant sur les facteurs d'échelle en télédétection a été réalisée par Woodcock et Strahler (1983 et 1987).

L'étude de Woodcock et Strahler (1983 et 1987) s'appuie sur le principe qu'une des caractéristiques fondamentales en télédétection est la résolution spatiale et que le choix de l'échelle d'observation doit être fait en fonction du type d'environnement à l'étude et des informations désirées. En effet, dans la plupart des domaines scientifiques, les chercheurs sélectionnent l'échelle à laquelle ils recueillent leurs données. En télédétection, par contre, le choix de l'échelle appropriée est plus complexe car il existe une multitude de résolutions spatiales, spectrales, radiométriques, de méthodes d'analyse, d'environnement et d'informations à extraire sur ces environnements.

Les auteurs ont donc développé une méthode basée sur les graphiques de variance locale. Appliqués sur différents types d'environnements tels la forêt, la ville, le périurbain et le milieu agricole, les graphes de variance locale révèlent les conclusions suivantes: a) premièrement l'information contenue dans les images varie en fonction de l'échelle de mesure déterminée par la résolution spatiale du capteur, b) deuxièmement la variance locale d'une image est liée à la relation entre la taille des objets composant la scène et la résolution spatiale du capteur, c) finalement, les multiples variations d'échelle à l'intérieur d'un environnement vont produire de multiples résolutions spatiales appropriées.

Une autre étude a également été menée par Cushnie (1987) portant sur les interactions entre la résolution spatiale et le degré de variabilité interne des différents couverts sur la précision de classification. À partir des données de télédétection acquises à 5 m par la suite dégradées à 10 m et 20 m, des classifications ont été exécutées en environnement urbain contenant quelques boisés et en milieu agricole. Les résultats de classifications obtenus suggèrent que la résolution spatiale de 20 m est suffisante pour classer les boisés et qu'à un niveau plus détaillé, il faudrait désigner des classes mieux définies pour obtenir de résultats plus précis. Toutefois, une conclusion intéressante que nous pouvons tirer de l'étude de Cushnie (1987) est qu'il existe une relation entre la résolution spatiale d'une image et le niveau d'exactitude de la classification des couverts. Cette relation étant dépendante du niveau de variabilité spectrale interne présent à l'intérieur de la classe donnée.

Par ailleurs, Atkinson et Danson (1988) abordent le concept de la résolution spatiale optimale en télédétection. Ils ont identifié des résolutions spatiales optimales pour des peuplements forestiers à l'aide de semi-variogrammes sur des données aéroportées à hautes résolutions afin de prendre en considération les relations statistiques spatiales qu'ils jugeaient négligées dans l'étude Woodcock et Strahler (1987). Leurs principaux résultats démontrent que pour les peuplements de pins de Corse, en fonction de l'année de plantation (1932, 1957, 1964, et 1978), la résolution spatiale optimale était de 14,60 m, 2,47 m, 1,65 m, et 1,82 m respectivement. En ce qui concerne les peuplements pin gris et de chênes, la résolution spatiale optimale était de 5,72 m et de 9,32 m. Leur étude a démontré qu'il existe bien une dépendance spatiale entre les peuplements de conifères et de feuillus et que la variabilité dépend de l'âge, du peuplement et de l'espèce. De plus, ces résultats démontrent qu'il n'y a aucune résolution spatiale optimale unique pour la discrimination des peuplements forestiers. Par contre, l'utilisation de semi-variogrammes dans la méthode proposée ne représente qu'une estimation statistique du comportement spatial du peuplement. Des recherches ultérieures doivent donc être

conduites pour mieux comprendre le phénomène de variabilité spatiale et spectrale à l'intérieur des peuplements.

Townshend et Justice (1988) ont, quant à eux, réalisé une étude visant à sélectionner la résolution spatiale requise pour un suivi de la végétation à l'échelle globale. Basé sur le principe que les modèles spatiaux de l'environnement à l'étude gouvernent les caractéristiques du capteur requises pour la détection des changements globaux, ils ont étudié le comportement de l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI) à des résolutions spatiales dégradées de 125 m à 4000 m. Afin de déterminer quelle était la ou les résolutions spatiales appropriées, les auteurs ont utilisé deux méthodes soient l'analyse de fréquence spatiale, appelée communément analyse de Fourier, et l'analyse de variance d'échelle.

Les résultats de leur étude ont démontré que les caractéristiques spatiales et temporelles de la surface possédaient une interrelation complexe qui est liée aux caractéristiques spatiales du capteur. Les résultats confirment également que la détection des changements d'occupation du sol doit être réalisée à de plus hautes résolutions spatiales mais qu'il est essentiel de prendre en considération les caractéristiques spatio-temporelles de la surface à l'étude. De plus, les auteurs mentionnent que peu importe la résolution spatiale choisie, il est préférable d'avoir à sa disposition des données multi-spatiales pour pouvoir effectuer des comparaisons et rassembler le plus grand nombre d'information possible.

Enfin, Marceau *et al.* (1994a) ont réalisé une étude afin d'évaluer l'impact de l'échelle de mesure, ou la résolution spatiale, et le niveau d'agrégation sur le niveau d'exactitude de classification de peuplements forestiers à partir de données aéroportées. Les données ont été dégradées à des résolution spatiale de 5 m, 10 m, 20 m, et 30 m et des classes forestières ont été établies en fonction de 3 niveaux d'agrégation. Par la suite une

classification par maximum de vraisemblance a été exécuté pour toutes les classes forestières à toutes les résolutions choisies.

Les résultats démontrent que pour la plupart des classes forestières, la variance tend à diminuer au fur et à mesure que la résolution spatiale diminue. Dans ce cas, l'impact du changement de résolution spatiale est plus grand que celui du changement du niveau d'agrégation. De plus, l'exactitude des résultats de classification peut être considérablement modifiée en fonction de la résolution spatiale et du niveau d'agrégation. Pour un certain niveau d'agrégation donné, certains peuplements forestiers requièrent une plus fine résolution spatiale alors que d'autres requièrent une résolution spatiale plus grossière.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont: a) l'information contenue dans les images de télédétection est dépendante de l'échelle de mesure déterminée par la résolution spatiale du capteur, b) en négligeant l'échelle et le niveau d'agrégation en classifiant des images de télédétection, nous pouvons obtenir des résultats aléatoires n'ayant qu'une faible correspondance avec les objets de la scène et c) il n'y a aucune résolution spatiale unique qui soit appropriée pour la détection et la discrimination de tous les objets en particulier dans un environnement aussi complexe que la forêt.

À la lumière des études mentionnées ci-dessus, nous sommes en mesure de constater l'importance de la résolution spatiale dans l'extraction d'information provenant des données de télédétection, mais également la nécessité d'abandonner les approches d'échantillonnage reposant sur un système de mesure arbitraire. En somme, ces auteurs proposent de se tourner vers la mise en œuvre de solutions originales afin de résoudre les problèmes associés au choix de l'échelle de mesure et du niveau d'agrégation approprié pour l'étude des entités géographiques d'intérêt.

1.6 La définition des entités géographiques d'intérêt

Comme nous avons pu le constater précédemment, la qualité des résultats de classification des images de télédétection dépend non seulement de la résolution spatiale mais également des objets composant l'environnement. En fait, la question essentielle qu'un chercheur doit se poser avant d'entreprendre toute manipulation que ce soit est: quels sont les objets à l'étude? (Marceau, 1992). Cette question aussi simple qu'elle puisse paraître, peut s'avérer difficile à répondre compte tenu de la complexité du milieu jumelé à la résolution spatiale des données de télédétection disponibles. Dans la vie de tous les jours, nous avons un besoin d'identifier les objets communs de notre environnement par une nomenclature normalisée telle les feuilles, les arbres etc. Ces noms sont rendus possibles grâce à notre perception, en particulier la vision en fonction de l'échelle, dans ce cas-ci, l'échelle humaine. Par contre, ces noms d'objets ne peuvent pas être appliqués systématiquement à différentes mesures spectrales et à diverses échelles tel que nous le faisons en télédétection (Raffy, 1995).

1.6.1 La définition des objets et des thèmes

Les premières tentatives afin de définir les aires géographiques reposaient sur la prémisse que le monde peut être divisé en régions distinctes sur la base de leurs propriétés physiques. La délimitation de ces aires géographiques en régions uniformes sur la base de critères préétablis rencontre toutefois certaines difficultés. Premièrement, une région géographique n'est pas un objet distinct. En effet, la surface de la Terre est composée d'une grande variété d'éléments ayant des distributions spatiales selon un continuum. Deuxièmement, les différents éléments se trouvant à la surface ne varient pas exactement de la même façon dans l'espace. Par exemple, la distribution biogéographique des grandes unités de végétation ne coïncide pas toujours avec les limites des sols et des climats. Troisièmement, la délimitation d'une région n'est valable qu'à un moment donné et non pour tous les autres moments. Finalement, une aire

géographique ne devrait jamais être considérée comme un élément isolé, mais plutôt comme une partie d'un système (Grigg, 1967).

Dans un environnement complexe, il devient donc plus difficile de classifier les objets car ceux-ci ne sont pas homogènes et n'ont pas de limites bien définies. Les objets, ou les entités géographiques, se définissent non seulement par leurs propriétés physiques et spectrales, mais également par leur localisation et leur interaction avec les objets voisins (Marceau *et al.*, 1992). Prenons pour exemple la forêt; celle-ci est composée de plusieurs peuplements forestiers ayant différentes organisations spatiales, structures forestières, hauteurs et taux de couvert. Le peuplement lui-même est le résultat de l'agrégation de plusieurs arbres caractérisés par l'essence, l'âge et les variabilités morphologiques et structurales inhérentes à chacun des individus. La forêt comporte également plusieurs arrangements variables tels les strates arbustives et herbacées, les clairières, les coupes forestières, les zones incendiées et les routes forestières qui se distribuent de façons discontinue et irrégulière. À chacun des niveaux d'observation de la forêt, nous trouvons des caractéristiques propres qui peuvent considérablement varier si l'on se retrouve à un autre niveau d'observation. Ces propriétés que possèdent les entités géographiques sont celles de l'échelle et du niveau d'agrégation spatial (Openshaw, 1984).

L'échelle, telle que définie par la cartographie, est le rapport entre une distance mesurée entre deux points sur une carte et la distance correspondant entre les deux points sur le terrain. L'échelle représente le concept par lequel les proportions entre les objets peuvent être décrites et illustrées, référant ainsi aux propriétés spatiales intrinsèques de tout phénomène (Marceau, 1992). Nous avons déjà énoncé auparavant que l'échelle d'observation est dépendante de la taille de la maille correspondant à la résolution spatiale du capteur. De plus, nous avons également vu qu'en modifiant l'échelle d'observation ou la résolution spatiale, le niveau d'exactitude de la classification des

couverts pouvait varier. Ceci est dû au fait qu'à chaque échelle d'observation, il existe un niveau d'agrégation spatiale qui représente un mélange particulier de plus petits éléments inclus à l'intérieur de la maille d'échantillonnage et qui vont caractériser l'entité géographique à cette échelle. La sélection de l'échelle d'observation par l'application d'une grille d'échantillonnage fixe et arbitraire sur une aire géographique peut s'avérer une difficulté pour définir les entités géographiques. Premièrement, parce que les limites des unités spatiales définies par une telle grille sont artificielles et ne correspondent pas aux limites des entités géographiques d'intérêt. Deuxièmement, parce qu'il existe une multitude de façons au moyen desquelles nous pouvons diviser une aire géographique en unités spatiales non superposables (Openshaw, 1984).

La première étape dans l'analyse et l'extraction des informations des images de télédétection, soit la définition des entités géographiques d'intérêt, se veut donc primordiale. En effet, comme nous avons pu le constater, l'établissement des classes des objets d'intérêt repose sur des facteurs d'échelle et de niveau d'agrégation qui peuvent influencer, dans un premier temps, les classes de signatures spectrales, puis, dans un second temps, les résultats de classification. Une étude de Marceau *et al.* (1994a) réalisée en environnement forestier démontre que la classification est considérablement modifiée en fonction de l'échelle de mesure et du niveau d'agrégation; certaines classes forestières étant mieux classifiées à des résolutions spatiales plus fines, d'autres à des résolutions spatiales plus grossières. La variance spectrale interne des pixels d'entraînement ayant tendance à augmenter à des résolutions spatiales plus fines, les résultats de classification se retrouvent affectés substantiellement. De plus, nous constatons qu'il n'existe aucune résolution spatiale unique permettant la détection et la discrimination de toutes les entités géographiques. Logiquement, nous serions donc en mesure d'identifier une résolution spatiale optimale pour chacune des entités correspondant à leurs caractéristiques spectrales et spatiales intrinsèques.

1.6.2 Les paramètres topographiques et les entités géographiques

Nous avons pu noter jusqu'à maintenant que la définition des entités géographiques d'intérêt nécessite de prendre en compte certains facteurs très importants soit l'échelle de mesure ou d'observation et le niveau d'agrégation des objets composant la classe. Ainsi, lorsqu'on étudie la forêt à l'échelle du peuplement, on définit celui-ci sur la base de son agrégation spatiale et des paramètres forestiers tels l'essence dominante, l'organisation spatiale, la structure forestière, la hauteur et le taux de couvert (densité). Cependant, la définition d'un peuplement reposant uniquement sur les paramètres forestiers et le niveau d'agrégation peut s'avérer insuffisante pour expliquer entièrement le comportement spectral et spatial si l'on étudie ce dernier du point de vue de la télédétection. Nous nous rendons à l'évidence que la topographie joue un rôle important dans la signature spectrale des peuplements. En effet, l'influence des effets topographiques a toujours été considérée comme l'un des problèmes majeurs pour la détection et la discrimination des peuplements forestiers (Heller et Ulliman, 1983; Karaska *et al.*, 1986). Naturellement, en raison des différentes conditions de pente et d'orientation, des variations de l'angle d'illumination et de la géométrie de la réflexion sont relevées, ceci entraînant des changements de réponses spectrales rendant plus difficile la discrimination des espèces (Conese *et al.*, 1988; Leprieur *et al.*, 1988).

Dans un contexte d'acquisition d'images de télédétection, la surface, la source d'illumination (le soleil) et la position du capteur ont des relations géométriques fixes. Par contre, l'aire géographique est, quant à elle, constituée d'une multiplicité de facettes ayant des angles d'incidence spécifiques en regard au rayonnement solaire. Le rayonnement solaire éclairant la surface avec un angle d'incidence toujours constant à un moment donné, ce sont les irrégularités topographiques qui vont créer les différentes variations de niveaux de gris dans l'image. De plus comme il n'existe pas de surfaces purement lisses, celles-ci étant toujours recouvertes d'eau, de végétation, de roches et

autres, ces différents types de couvert vont également contribuer aux variations de niveaux de gris (Campbell, 1987).

Les différentes variations de niveaux de gris présentes sur une image de télédétection acquise au-dessus d'une région accidentée sont donc dues à la variabilité des éléments constituant le couvert conjuguée à la topographie de la surface. Afin de séparer ces deux différents types d'information, on procède généralement à des rapports de bandes spectrales. Ces méthodes consistent à sélectionner les bandes spectrales les plus significatives, puis à prendre la valeur d'un pixel donné dans une bande spectrale et la diviser par sa valeur dans l'autre bande. La procédure est répétée pour tous les pixels et produit une image résultante où les valeurs de chaque pixel sont les résultats des divisions. Ces images dérivées nous donnent l'information sur la réflectance des objets où les effets topographiques sont minimisés (Campbell, 1987).

Ainsi, les chercheurs qui ont réalisé des études dans les milieux où le relief est accidenté ont toujours tenté de lisser les effets dus à la topographie les considérant comme un bruit inutile. Une façon plus originale d'aborder le problème du relief serait d'intégrer les paramètres topographiques dans la définition des entités géographiques. Cela nous permettrait d'observer dans un premier temps les effets de la topographie sur le comportement spectral et spatial des entités géographiques d'intérêt et par la suite de vérifier si l'on doit systématiquement intégrer ces paramètres dans leur définition. Enfin pour un peuplement forestier présentant *a priori* les mêmes caractéristiques structurales, si celui-ci se trouve en situation de topographie accidentée, nous serions donc en mesure de dire s'il faut inclure de nouveaux paramètres topographiques dans sa définition pour parler désormais d'une autre entité géographique ou est-ce que ces paramètres sont négligeables et qu'il s'agit toujours de la même entité géographique peu importe ses conditions topographiques?

1.7 L'approche de la résolution spatiale optimale

Un regard critique des 30 dernières années nous dévoile qu'en dépit des grandes attentes manifestées envers le potentiel évident de la télédétection, la cartographie basée sur les classifications d'images numériques reste une discipline empirique ne tenant pas toujours compte du caractère spatial des objets à l'étude et menant à des résultats non satisfaisants malgré les améliorations technologiques et méthodologiques. Ainsi, basé sur le principe que la définition des entités géographiques et le choix de l'échelle de mesure sont normalement réalisés de façon subjective et dans la majorité des cas non appropriés, Marceau *et al.* (1993, 1994b) ont développé une approche originale pour éviter ces problèmes. Cette approche consiste à identifier les résolutions spatiales optimales pour chacune des entités géographiques d'intérêt plutôt que de s'appuyer sur une résolution spatiale unique lors de l'extraction des informations contenues dans les images de télédétection.

Dans le contexte de données spatiales acquises à partir d'un système de télédétection, une image numérique peut être conceptualisée comme étant une grille d'échantillonnage appliquée sur une aire géographique donnée. Chaque maille de la grille a une forme et une dimension fixe et arbitraire qui est définie par la résolution spatiale du capteur. La mesure correspondant à chaque pixel de l'image numérique est une intégration du flux d'énergie émise ou réfléchi par un assemblage particulier d'objets contenus à l'intérieur de la maille qui est délimitée par le champ d'observation utile instantané du capteur (IFOV). Ce problème d'échelle de mesure appropriée pour une entité géographique d'intérêt peut être illustré de la façon suivante pour l'environnement forestier: premièrement, quand la taille de la maille, qui correspond à un pixel sur l'image, est plus fine que l'entité géographique d'intérêt (objet étudié), le pixel peut ne représenter qu'une de ses composantes telle que la couronne de l'arbre, l'ombre ou le sous-bois. Ceci se traduit, en terme spectral, par une forte variance interne de la classe. À l'opposé, quand la taille de la maille est considérablement plus grande que l'objet étudié, les pixels qui

composent l'image peuvent englober plusieurs éléments connexes (clairière, route forestière, sols nus ou autres peuplements forestiers), ce qui se traduira également par une forte variance. Les résultats alors obtenus avec des méthodes de classification pixel à pixel basés sur ces résolutions spatiales non appropriées n'auraient donc qu'une faible correspondance avec l'objet étudié.

Entre ces deux extrêmes, il existe un équilibre où la taille de la maille englobe un mélange approprié des éléments composant l'entité géographique d'intérêt (Atkinson et Danson, 1988; Marceau *et al.*, 1994b). Dans le cas d'un peuplement forestier par exemple, il s'agirait de la taille de maille qui engloberait le meilleur amalgame de couronne d'arbre, d'ombre et de sous-bois caractéristique de ce peuplement. À cette taille de maille ou à cette résolution spatiale, on devrait retrouver la plus faible variance spectrale interne de la classe d'intérêt. C'est à cette résolution spatiale dite optimale que l'on peut logiquement présumer obtenir les meilleurs résultats avec des classifications pixel à pixel (Marceau *et al.*, 1994b).

La méthode proposée consiste, dans un premier temps, à définir *a priori* les entités géographiques à l'étude. En deuxième lieu, à déterminer un critère d'optimisation pour le choix de la taille de la maille appropriée. Troisièmement, de progressivement agréger les données de télédétection acquises à haute résolution. Par la suite, de procéder à l'application du critère d'optimisation aux données spatialement agrégées. Finalement, la validité des résultats en regard aux objectifs de recherche est vérifiée. Chacune des étapes méthodologiques sera élaborée en détail au chapitre 4.

Les résultats obtenus au cours de l'étude réalisée par Marceau *et al.* (1993; 1994b) dans un environnement contrôlé, soit une portion de la forêt expérimentale de Petawawa (Ontario, Canada), démontrent plusieurs éléments. D'abord, pour l'ensemble des classes à l'étude, la variance spectrale est relativement élevée pour les plus hautes résolutions

spatiales, elle atteint un minimum à des résolutions intermédiaires, puis remonte légèrement et se stabilise à des résolutions spatiales plus grossières. Pour les classes de peuplements naturels et de plantations, les résolutions spatiales optimales respectives varient entre 2,5 m et 21,5 m. La résolution spatiale semble affectée par les paramètres spatiaux et structuraux des peuplements forestiers. De plus, l'analyse de variance entre chaque paire de classes nous démontre que la séparabilité spectrale est à son maximum ou très près lorsque les classes sont à leur résolution spatiale optimale. Cette étude a souligné l'importance du concept de la résolution spatiale optimale en démontrant que les variances spectrales, en fonction des différentes résolutions spatiales, pouvaient être interprétées en terme d'un niveau d'agrégation spatial particulier de l'entité géographique d'intérêt. En dernier lieu, cette étude a également démontré le lien complexe qui existe entre la définition des entités géographiques d'intérêt et la sélection de l'échelle de mesure appropriée dans l'utilisation de données géographiques.

1.8 Les objectifs de ce mémoire

Pour répondre à la problématique et aux constats énoncés plus haut, l'objectif général de ce projet d'étude est d'appliquer l'approche de la méthode de la résolution spatiale optimale dans un environnement complexe, soit un milieu forestier naturel montagneux. Les objectifs spécifiques sont:

1. de procéder à l'identification de la résolution spatiale optimale pour chaque type de peuplement forestier, en terrain de faible inclinaison comme en terrain pentu, sur le transect des Monts de Lacaune (Tarn, France),
2. de vérifier l'utilité des paramètres topographiques (pente et exposition) dans la définition des entités géographiques d'intérêt,
3. d'identifier les canaux permettant la séparabilité spectrale maximale interclasse et la validité de la résolution spatiale optimale.

Chapitre 2

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES UTILISÉES

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES UTILISÉES

2.1 La présentation de la zone d'étude

2.1.1 Description générale

Le secteur des Monts de Lacaune (Tarn, France, $43^{\circ}66' \text{ N}$, $2^{\circ} 68' \text{ E}$), caractérisé par de hauts plateaux vallonnés dont les altitudes s'étagent de 900 à 1260 m, a été retenu pour son taux de boisement élevé (75%), la diversité des espèces forestières que l'on y retrouve et une sylviculture active, s'accompagnant d'opérations sylvicoles modifiant la structure spatiale des peuplements. De plus, ces Monts sont caractérisés par différents types de pente (en moyenne 11°) et toutes les expositions y sont bien représentées (Durrieu et Deshayes, 1994). Cette région forestière s'avère donc très intéressante pour vérifier nos objectifs de recherche.

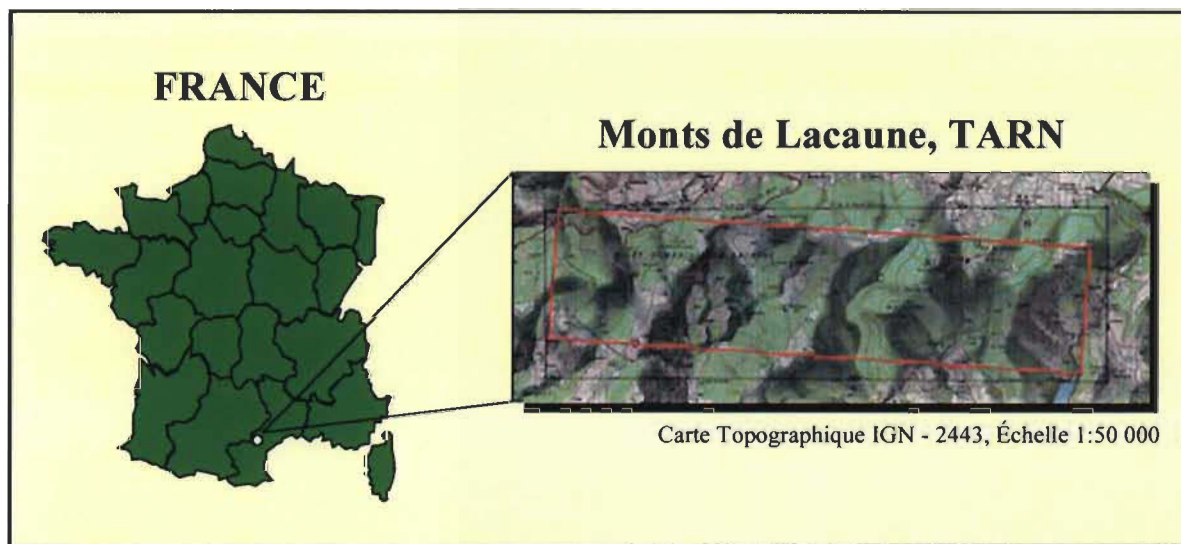


Figure 2.1 La zone d'étude des Monts de Lacaune (Tarn, France)
note: Le tracé rouge représente le transect étudié

Les Monts de Lacaune constituent un relief massif de moyenne montagne, où l'on retrouve une alternance de sommets convexes et de vallées accueillant des rivières faiblement encaissées. Cette région, qui se situe à la bordure sud-ouest du Massif Central, présente des roches acides et saturées en quartz (silice), ce dernier constituant le principal minéral de cette région. Nous y retrouvons des formations gneissiques et granitiques ayant donné naissance à des sols bruns acides, bruns ocreux et ocre podzoliques.

La zone d'étude est caractérisée par des conditions climatiques aquitaines. Comme il s'agit d'une variation du climat atlantique par sa position en bordure du bassin aquitain, on y retrouve annuellement une pluviométrie un peu plus faible, de l'ordre de 1000 mm à 1500 mm en fonction de l'altitude. Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 11°C à 13°C, avec des étés doux, soit 18°C à 20°C en juillet, et des hivers cléments, soit 2°C à 4°C en janvier.

2.1.2 La végétation forestière

Comme nous l'avons déjà mentionné, les Monts de Lacaune (53 000 ha de forêt de production et un taux de boisement de 75%). offrent un cadre propice à l'étude de la végétation forestière. Leur situation à l'intersection de la zone biogéographique atlantique et méditerranéenne est définie par le climat, la topographie et le bilan hydrique. Nous y trouvons donc principalement l'étage submontagnard et l'étage subméditerranéen. Ces étages sont caractérisés par le domaine de la chênaie-hêtraie subatlantique silicicole avec quelques espèces méditerranéennes dont la présence est due à la proximité de la Mer Méditerranée (moins de 100 km). A la figure 3.2, nous retrouvons la répartition des principaux peuplements forestiers présents sur la zone d'étude, selon la nomenclature de l'IFN.

Feuillus		
- Futaies de hêtres	3,7%	
- Futaies feuillus (chênes, hêtres)	4,8%	
- Total des futaies de feuillus		8,5%
- Taillis de chênes	3,6%	
- Taillis de hêtres	5,1%	
- Autres taillis	22,2%	
- Total des taillis de feuillus		30,9%
- Futaies + taillis de feuillus		3,9%
- Total des feuillus		43,3%
Résineux		
- Futaies de sapins ou d'épicéas	2,0%	
- Autres futaies résineuses (Douglas, mélanges)	0,4%	
- Total futaies résineuses		2,4%
- Reboisements résineux en plein (moins de 40 ans)	40,3%	
- Reboisements résineux en bande (moins de 40 ans)	2,9%	
- Total des reboisements		43,2%
- Total des résineux		45,6%
Autres		
- Mélanges feuillus résineux		0,3%
- Boisements morcelés et lâches (feuillus et résineux)		10,8%
		100%

Figure 2.2 Répartition des peuplements forestiers sur la zone d'étude des Monts de Lacune (Adapté de Durrieu et Deshayes, 1994)

La chênaie, composée de chênes pédonculés (*Quercus robur*) et de chênes rouvres (*Quercus petrae*), domine plutôt les pentes au bas des versants, alors que la hêtraie, composée essentiellement de hêtres (*Fagus sylvatica*), occupe les plus hautes altitudes ou les versants plus frais et plus humides, notamment ceux à exposition nord. La structure forestière

des peuplements de feuillus est principalement le taillis, mais nous y trouvons tout de même une part importante de futaie ¹.

Depuis maintenant quelques années, l'Office National des Forêts (ONF) a réalisé plusieurs reboisements avec des résineux tels l'épicéa (*Picea abies*) et le sapin Douglas (*Pseudotsuga* sp.) sur plus de 39% de la surface boisée de production des Monts de Lacane définie par l'IFN. Les peuplements résineux ont, quant à eux, une structure forestière composée uniquement de futaie mais on peut toutefois retrouver une variance au niveau du type de reboisement, soit le reboisement en bande ou en plein.

2.2 La description des données aéroportées

2.2.1 Les caractéristiques du capteur

L'instrument RAMI est un spectromètre multispectral à très haute résolution développé afin de préparer les futures missions spatiales du Centre National d'Étude Spatiale français (CNES). Sa tête optique, munie de 3 objectifs identiques et télécentriques, correspond à chacune des trois bandes spectrales. Celles-ci vont former l'image de la ligne de paysage sur une barrette CCD (*Charged Couple Device*), faisant appel au même principe de balayage que le satellite français SPOT.

Tableau 2.1 Caractéristiques du capteur aéroporté multispectral

Instrument	Spectromètre multispectral (RAMI)
Bandes Spectrales	Bande du vert 510-600 nm
	Bande du rouge 610-720 nm
	Bande du PIR 760-950 nm
Champ total (FOV)	51°
Champ utile instantané (IFOV)	0,54 mrd
Barrettes CCD	1728 éléments
Tête optique	3 objectifs télécentriques identiques

CNES, 1994

¹ voir annexe I

Chacun des 1728 éléments formant la barrette CCD délivre un signal électrique proportionnel à la luminance du pixel correspondant au sol. L'ensemble des signaux simultanés constitue une ligne d'image et l'analyse ligne par ligne du paysage est réalisée par le mouvement de l'avion.

2.2.2 Les paramètres d'acquisition

Le secteur d'étude a été survolé le 7 juin 1994 à 11h 14 min. (heure solaire) par l'Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection (ARAT), muni du capteur multispectral. À une altitude de 3000 m, le RAMI offre une résolution spatiale au sol de 1,667 m. Les données en trois bandes spectrales homologues de SPOT HRV (vert, rouge et proche infrarouge) ont été acquises simultanément au-dessus du transect, produisant une image de 1728 pixels par ligne et de 7950 lignes soit une surface couvrant 3,5 x 13 km (Figure 2.3).

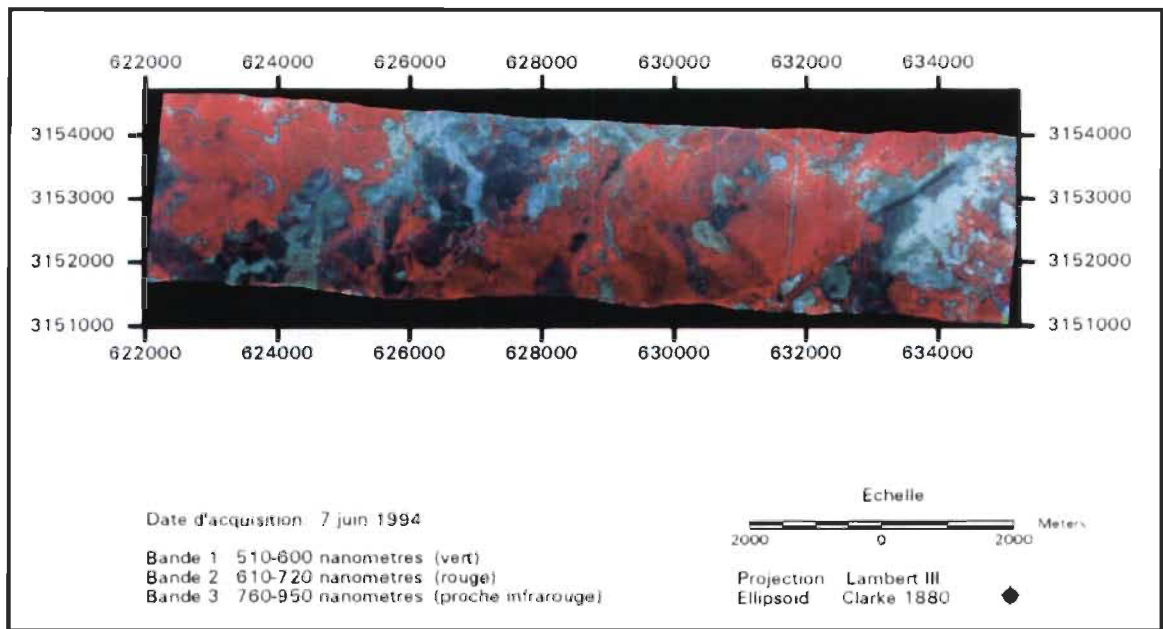


Figure 2.3 Image numérique aéroportée acquise au-dessus du transect des Monts de Lacane.

Au moment de l'acquisition de l'image, l'angle azimutal solaire pour notre zone d'étude était de 158° et l'angle zénithal, ou angle d'incidence solaire, de 22° par rapport à la

normale (terrain plat) (Figure 2.4). C'est à partir de ces paramètres solaires que nous avons défini les classes d'exposition pour les versants présents sur la zone d'étude afin de prendre en compte ce paramètre topographique dans la définition des entités géographiques d'intérêt.

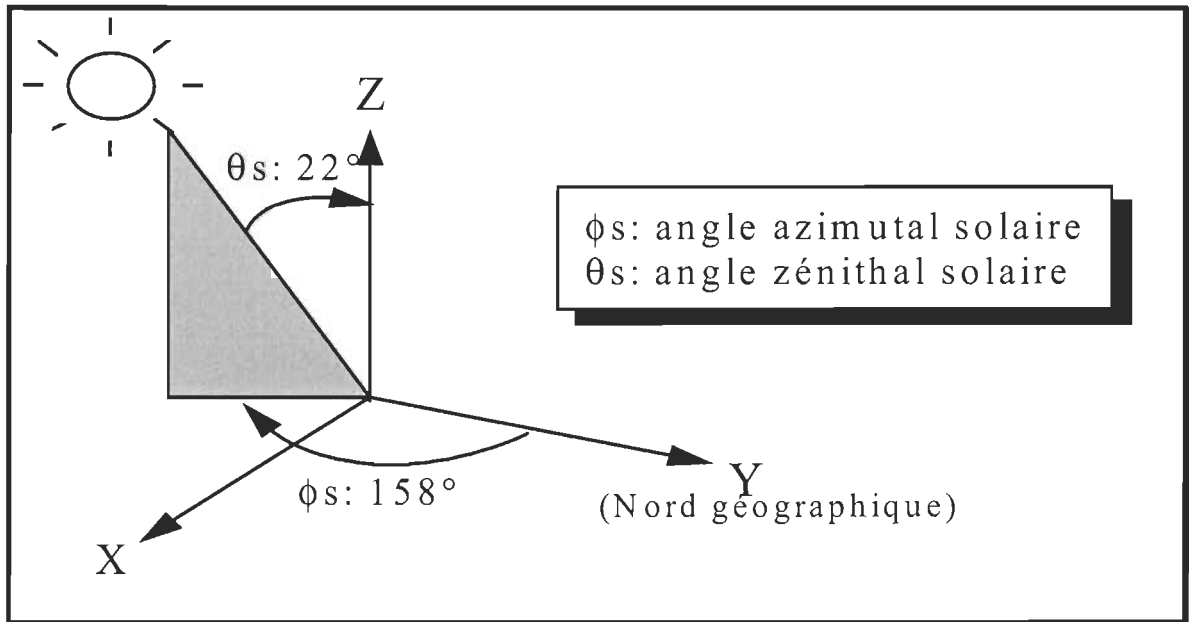


Figure 2.4. Angles zénithal et azimutal solaires lors de l'acquisition

2.2.3 Les corrections géométriques

Les images de télédétection contiennent des déformations spatiales causées, soit par la courbure de la Terre et les variations topographiques, soit par les erreurs dues au système de mesure ou par le mouvement de la plate-forme. Comme il s'agit d'un capteur aéroporté, les corrections géométriques sont toujours plus difficiles à effectuer que pour les capteurs satellitaires en raison des turbulences atmosphériques qui affectent l'avion. L'image numérique aéroportée des Monts de Lacane a été corrigée géométriquement par le CNES et la société ISTAR à l'aide d'un modèle numérique de terrain puis géoréférencée en projection Lambert 3 ellipsoïde Clarke 1880 à l'aide de modèles mathématiques et des redressements avec les points d'amers ou points de calage.

2.3 La description des données de terrain

Dans le cadre d'une recherche en télédétection, des études de terrains doivent être menées afin d'acquérir des informations sur la région géographique. En fonction du niveau de connaissance et des objectifs de recherche, les efforts déployés ainsi que les méthodes pour recueillir les diverses données complémentaires peuvent varier (Campbell, 1987). Voici les principales données de terrain qui ont complété notre recherche.

2.3.1 Le modèle numérique de terrain (MNT)

Par modèle numérique de terrain (MNT), on entend le codage numérique de la surface de la Terre. Cette représentation de l'altitude d'une aire géographique de façon numérisée peut intégrer d'autres paramètres physiographiques tels que la pente, l'orientation des versants, la délimitation des bassins-versants, etc... De façon générale, le MNT se présente sous une forme analogue à une image de télédétection, exception faite que dans le premier cas les valeurs des pixels représentent soit l'altitude, le degré de pente ou d'orientation, alors que dans le second, ils représentent la mesure spectrale des objets présents à la surface. Ainsi, nous pouvons classer et analyser les MNT pratiquement de la même manière que les autres images afin d'obtenir l'information désirée (Campbell, 1987; Labbé, 1992). Nous avons utilisé au cours de cette recherche, un MNT construit par l'Institut Géographique National (IGN) de France à partir des courbes de niveaux de cartes topographiques. Ce MNT au pas de 40 m, ce qui correspond à la taille de maille, nous a donc permis de connaître quelles étaient l'altitude, la pente et l'orientation en tout point sur la zone d'étude des Monts de Lacane.

2.3.2 La couverture forestière numérisée

Dans le cadre de la méthode de cartographie automatisée, l'Inventaire Forestier National (IFN) de France procède à la numérisation des cartes forestières. En effet,

l'IFN, comme tout service d'inventaire forestier, crée des cartes forestières à partir de l'interprétation des photographies aériennes et de mesures ponctuelles au sol. Par la suite, ces cartes à l'échelle de 1:25 000 et de 1:50 000 sont transformées sous forme de fichiers numériques à l'intérieur desquels nous retrouvons les limites des types de formation végétale dont principalement les peuplements forestiers. Dans cette étude, nous avons utilisé une carte forestière numérisée de la forêt des Monts de Lacaune à l'échelle 1:25 000. La numérisation des limites forestières nous permet de procéder à une meilleure estimation de la répartition des surfaces boisées de la zone d'étude tout en étant compatible avec l'image numérique aéroportée ainsi que le MNT (Inventaire Forestier National, 1992).

2.3.3 Les relevés de terrain

Des contrôles au sol ont été entrepris afin d'estimer la hauteur et la densité moyenne des peuplements ainsi que vérifier la pente et l'orientation de nos sites. Ces relevés nous ont permis, dans un premier temps, de vérifier l'exactitude du MNT et de la carte forestière numérisée puis, dans un second de temps, de valider la sélection de nos sites pour chaque classe forestière. Comme il s'avérait impossible de visiter tous les sites au cours de cette recherche, nous avons donc procédé à l'examen de plusieurs placettes d'échantillonnage sélectionnées tous les 50 m le long d'un transect traversant chacun des peuplements homogènes étudiés. A chaque point d'échantillonnage, la placette circulaire de 7 m de rayon a été délimitée. Par la suite, tous les arbres présents à l'intérieur de celle-ci ont été identifiés, comptés et leur hauteur, mesurée. Quoique ne couvrant pas la totalité de la surface d'agrégation maximale, les placettes d'échantillonnage nous permettaient d'obtenir des observations locales, notamment la pente et l'orientation, et les interventions sylvicoles afin de valider les sites sélectionnés pour chaque classes.

2.3.4 Les autres données utilisées

Afin de mieux vérifier l'emplacement des sites sélectionnés et de procéder au géoréférencement de l'image et du MNT, d'autres données complémentaires ont été utilisées au cours de cette recherche soient:

- deux jeux de photographies aériennes à l'échelle de 1:8000 et 1:20 000 acquises simultanément lors de la campagne de données aéroportées,
- des cartes topographiques de l'IGN à l'échelle de 1:25 000 (Lacaune 2443 est et ouest) et à 1:50 000 (Lacaune 2443).

Chapitre 3

**APPLICATION DE LA
MÉTHODE DE LA
RÉSOLUTION SPATIALE
OPTIMALE**

APPLICATION DE LA MÉTHODE DE LA RÉOLUTION SPATIALE OPTIMALE

Chapitre

3

Comme nous l'avons décrit lors de l'introduction, Marceau *et al.* (1994b) ont développé une approche méthodologique pour identifier la résolution spatiale optimale appliquée sur des peuplements de conifères dans un environnement contrôlé telle une plantation. Cette méthodologie implique les étapes suivantes : 1) définir *a priori* les entités géographiques d'intérêts à l'étude, 2) déterminer un critère d'optimisation, 3) progressivement agréger les données acquises à haute résolution, 4) appliquer le critère d'optimisation aux série de données spatialement agrégées, 5) et, vérifier la validité des résultats obtenus en relation avec les objectifs de l'étude.

Or, dans le cadre de cette étude, nous appliquons cette fois-ci l'approche méthodologique dans un environnement complexe où l'on retrouve une topographie accidentée, un mélange de feuillus et de conifères, des interventions sylvicoles et également une mosaïque forestière hétérogène. Des améliorations à la méthodologie ont donc été faite, notamment au niveau de la définition des entités géographiques afin de vérifier l'influence des paramètres topographiques sur la résolution spatiale optimale et également au niveau de la validation des résultats en intégrant des statistiques multivariées afin de prendre en considération toutes les classes dans l'espace multispectral.

3.1 La définition des entités géographiques d'intérêt

La première étape consiste à définir clairement les entités géographiques étudiées. L'échelle d'observation choisie dans le cadre de cette étude est le peuplement forestier. Le peuplement est défini comme une unité homogène sur la base de plusieurs facteurs: composition, organisation spatiale, essence et structure forestière, hauteur et taux de

couvert, ces facteurs étant susceptibles d'influencer le comportement spectral et spatial du peuplement. Dans le cadre de cette étude, la définition des peuplements a été faite selon la nomenclature de l'IFN.

3.1.1 La nomenclature de l'Inventaire Forestier National

Le peuplement forestier tel que défini selon la nomenclature de l'IFN (Inventaire Forestier National, 1990) repose sur plusieurs critères:

Composition: Selon le cas, la composition est définie par les notions de pureté ou de prépondérance, par l'indication d'une essence précise ou d'un groupe d'essences (notamment les feuillus d'une part, les résineux d'autre part).

- On appelle peuplements purement feuillus (ou purement résineux), ceux où les feuillus (ou les résineux) forment au moins 75% du couvert boisé.

Les peuplements autres que purement feuillus ou purement résineux sont dits peuplements mixtes.

Organisation spatiale: Ce critère de définition réfère aux caractéristiques spatiales des peuplements forestiers en fonction des interventions humaines (coupes forestières) ou naturelles (feux, maladies).

Pour les feuillus:

- On appelle couvert plein, les peuplements de feuillus n'ayant subi aucune intervention sylvicole. Les arbres couvrent ainsi l'ensemble de la surface occupée par le peuplement.
- On appelle couvert éclairci, les peuplements ayant subits des coupes forestières en bande ou en plein, ceci modifiant la surface de sol occupé.

Pour les résineux:

- On appelle adultes couvrants, les peuplements de résineux dont les couronnes des arbres couvrent l'ensemble de la surface. Ces peuplements n'ayant évidemment subi aucune intervention sylvicole.

- On appelle jeunes couvrants, les peuplements de résineux dont les arbres, dû à leur plus jeune âge, ne couvrent pas la totalité de la surface. Dans ce cas, les bandes de reboisement sont encore visibles.

Essence: L'essence fait appel à l'espèce forestière prédominante dans le peuplement.

- On appelle peuplements purs d'une essence ceux où cette essence forme au moins 75% du couvert boisé.

Structure forestière: Les types de structures forestières sont divisés en taillis, futaie et mélange taillis-futaie (voir annexe 1):

- La futaie, en dehors du cas des jeunes boisements, est définie principalement par sa hauteur supérieure à 12 mètres, le taillis vieilli lui étant rattaché sauf si ses caractéristiques de taillis sont restées très nettes.
- Le taillis, qui est constitué d'arbres de petites dimensions obtenus par les rejets des souches ou des drageons, peut par contre, rattachés des futaies basses (inférieur à 10-12 mètres); les futaies basses résineuses resteront classées comme futaies.
- Le mélange taillis-futaie concerne les mélanges de taillis (feuillus) et de futaie (feuillues et résineuses), en deux étages; il doit s'agir de mélanges dans lesquels le taillis a un couvert absolu d'au moins 25%, la futaie ayant au moins 10% du couvert absolu, sans excéder 65% de couvert relatif.

Hauteur et taux de couvert: La hauteur est également un critère important ainsi que le taux de couvert qui fait appel à la densité du peuplement.

3.1.2 Les niveaux d'agrégation retenus

Les classes ont non seulement été établies sur la base des paramètres forestiers décrits ci-dessus mais également sur le niveau d'agrégation des peuplements. En effet, comme nous l'avons énoncé auparavant, à chaque échelle d'observation, il existe un niveau d'agrégation spatiale qui représente un mélange particulier de plus petits éléments inclus à l'intérieur de la maille d'échantillonnage et qui vont caractériser l'entité géographique à cette échelle. En ce qui concerne l'étude d'un environnement forestier, nous pouvons déterminer trois niveaux principaux d'agrégation (Figure 3.1). Dans le contexte d'un

inventaire, les peuplements forestiers tels que définis auparavant se situe au niveau trois.

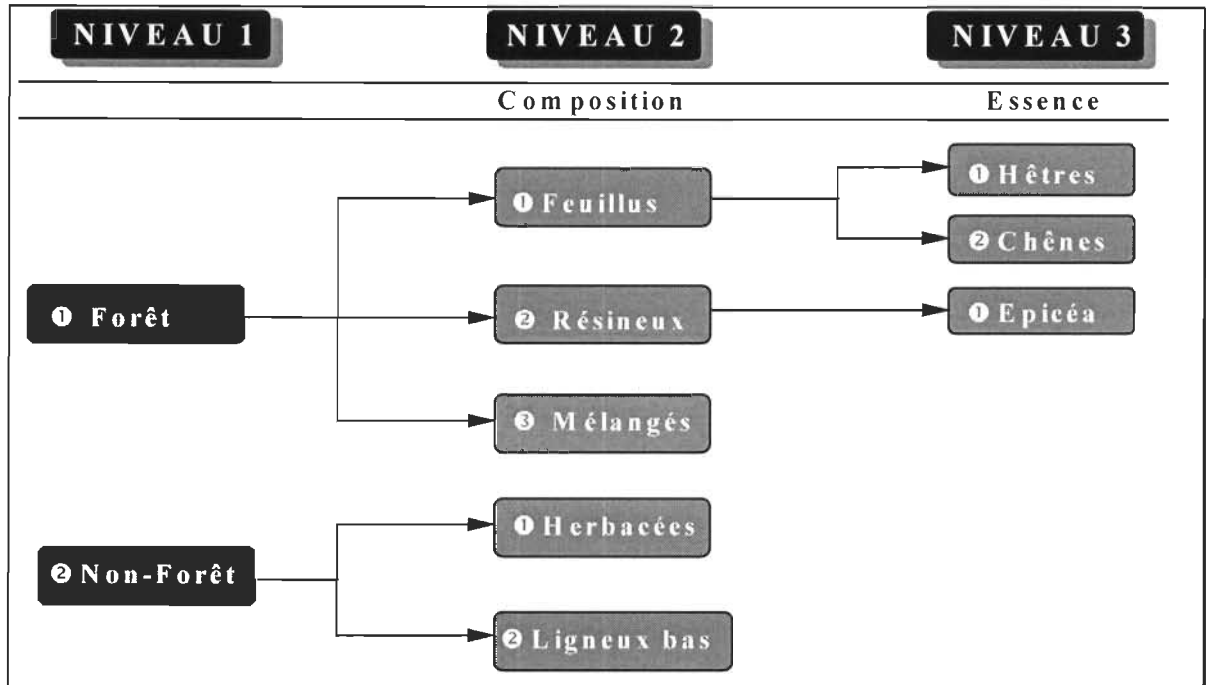


Figure 3.1. Niveau d'agrégation selon la nomenclature de l'IFN
(sur le transect des Monts de Lacaune, Tarn)

3.1.3 La modélisation de la topographie

Comme nous l'avons mis en évidence lors de la problématique, nous pouvons présumer qu'il pourrait devenir nécessaire d'inclure les facteurs topographiques tels que la pente et l'exposition solaire du versant dans la définition des entités géographiques d'intérêt lorsqu'il y a présence de topographie. En effet, comme nous avons constaté, le peuplement forestier est défini sur la base de plusieurs facteurs comme la composition, l'essence dominante, les paramètres structuraux tels que la hauteur, la densité, le taux de couvert ou encore les interventions sylvicoles. Dans un milieu accidenté par contre, nous ne sommes pas encore en mesure de dire si les paramètres topographiques doivent être intégrés dans la définition des entités géographiques. Cette étude tente donc d'observer dans un premier temps les effets de la topographie sur les comportements

spectral et spatial d'une image multispectrale de télédétection et par la suite de vérifier si l'on doit intégrer ces paramètres dans la définition des entités géographiques d'intérêt. Ceci nous permettra de répondre à la question fondamentale suivante: pour un peuplement forestier présentant *a priori* les mêmes caractéristiques structurales, celui-ci se trouvant en situation de topographie accidentée, faut-il inclure de nouveaux paramètres topographiques dans sa définition pour parler désormais d'une autre entité géographique ou est-ce que ces paramètres sont négligeables et qu'il s'agit toujours de la même entité géographique peu importe ses conditions topographiques?

Afin d'intégrer les paramètres topographiques dans la définition des entités géographiques d'intérêt, nous avons développé une approche méthodologique afin d'obtenir des classes qui soient à la fois homogènes en pente, en exposition solaire et en type de peuplements forestiers. Cette approche est schématisée à la Figure 3.2.

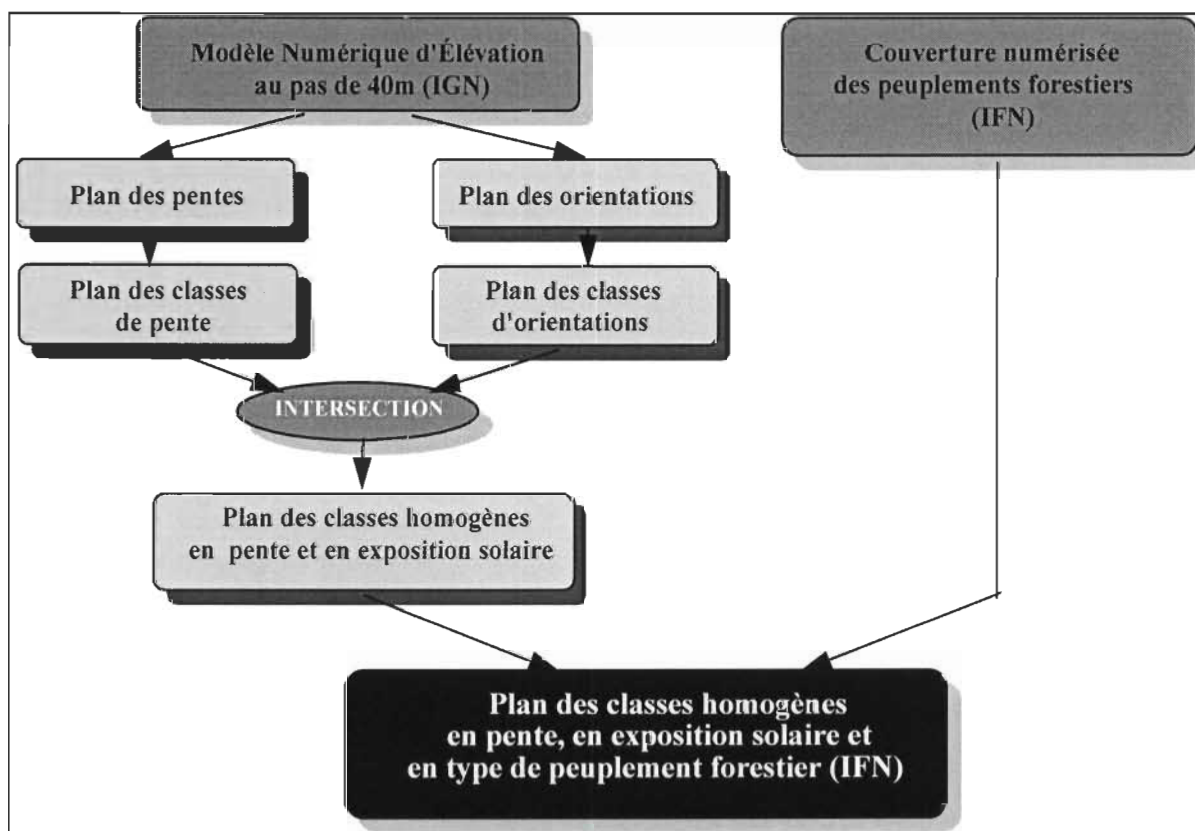


Figure 3.2. Approche méthodologique pour l'obtention de classes homogènes

À partir du MNT, nous avons dérivé un plan des pentes et un plan des orientations. Par la suite, cinq classes de pente (0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, et 40% et plus) et trois classes d'orientation (face, côté et opposée) ont été créées. L'intersection du plan des classes de pente et du plan des classes d'orientation nous donne un plan de classes homogènes en pente et en exposition. En croisant cette fois-ci ce plan avec la couverture forestière numérisée, nous obtenons un plan de classes homogènes en pente, en exposition et en peuplements forestiers pour l'ensemble de la zone d'étude.

De ce plan résultant des classes homogènes et de l'image numérique mais aussi des photographies aériennes et des relevés sur le terrain, six sites ont été sélectionnés pour chacune des pentes et des expositions (opposé, côté et face par rapport à l'éclairement solaire). Afin de favoriser une meilleure sélection des sites, nous avons choisi ces derniers dans le tiers central de l'image numérique aéroportée pour réduire l'effet de l'angle de visée du capteur et ainsi diminuer les variations spectrales dues à ce phénomène (O'Neill *et al.*, 1995). De plus, en ce qui concerne les peuplements se situant en terrain de faible inclinaison, nous avons regroupé les différentes expositions en une seule classe comportant 18 sites. Ce nombre de sites nous permet d'évaluer plus significativement la variabilité spectrale du peuplement en terrain de faible inclinaison et d'observer si l'exposition affecte la résolution spatiale optimale dans ces conditions.

3.1.4 Les peuplements forestiers à l'étude

Les classes forestières retenues pour cette étude, en considérant les paramètres forestiers et topographiques ainsi que le niveau d'agrégation des entités géographiques, sont décrites au Tableau 4.1. Certaines classes forestières, en raison du nombre insuffisant de sites représentatifs dans les différentes conditions de pente et d'exposition, n'ont pu être intégrées dans cette recherche.

Tableau 3.1 Les peuplements forestiers à l'étude

Classe	Essence	Organisation Spatiale	Structure Forestière	Hauteur (m)	Taux couvert (%)	Pente (%)	Exposition solaire	Nb sites
<i>Terrain faible inclinaison</i>								
1	Hêtre	Couvert plein	Taillis	6-10	90-100	0-10	Toutes	18
1a	"	"	"	"	"	"	<i>Opposé</i>	6
1b	"	"	"	"	"	"	<i>Côté</i>	6
1c	"	"	"	"	"	"	<i>Face</i>	6
2	Feuillus	Couvert plein	Taillis	6-10	90-100	0-10	Toutes	18
2a	"	"	"	"	"	"	<i>Opposé</i>	6
2b	"	"	"	"	"	"	<i>Côté</i>	6
2c	"	"	"	"	"	"	<i>Face</i>	6
3	Épicéa	Adultes couvr.	Futaie	21-25	90-100	0-10	Toutes	18
3a	"	"	"	"	"	"	<i>Opposé</i>	6
3b	"	"	"	"	"	"	<i>Côté</i>	6
3c	"	"	"	"	"	"	<i>Face</i>	6
4	Épicéa	Jeunes couvr.	Futaie	11-15	70-80	0-10	Toutes	18
4a	"	"	"	"	"	"	<i>Opposé</i>	6
4b	"	"	"	"	"	"	<i>Côté</i>	6
4c	"	"	"	"	"	"	<i>Face</i>	6
<i>Terrain pentu</i>								
5a	Hêtre	Couvert plein	Taillis	11-15	90-100	20-30	<i>Opposé</i>	6
5b	"	"	"	6-10	"	"	<i>Face</i>	6
6a	Feuillus	Couvert plein	Taillis	11-15	90-100	20-30	<i>Opposé</i>	6
6b	"	"	"	6-10	"	"	<i>Face</i>	6
7a	Feuillus	Couvert éclairci	Taillis-Futaie	11-15	70-90	20-30	<i>Côté</i>	6
7b	"	"	"	6-10	"	"	<i>Face</i>	6

3.2 La sélection du critère d'optimisation

La deuxième étape consiste à déterminer un critère d'optimisation pour trouver la taille de maille qui maximisera la détection et la discrimination de chaque classe forestière. Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, la variance spectrale intraclasse est très importante dans le cadre théorique de la résolution spatiale optimale d'images de télédétection. En effet, si l'on parvient à trouver une résolution spatiale à laquelle on trouve la plus faible variance intraclasse, correspondant à la taille de la maille qui englobe un mélange approprié des éléments composant notre entité géographique d'intérêt, de meilleurs résultats de classification pixel à pixel devraient être obtenus. De plus, la recherche des variances minimales intraclasse permet du même coup de réduire les zones de confusion spectrale interclasse, ce qui favorisera la séparabilité de ces classes. Voilà donc pourquoi nous avons retenu ce critère d'optimisation.

3.3 L'agrégation progressive des données

3.3.1 Le processus d'agrégation des données

Autour du pixel central de chacun des sites sélectionnés, la troisième étape consiste à agréger spatialement les données spectrales en augmentant de deux pixels à chaque fois la taille de la fenêtre (de 3x3, 5x5,...à 19x19, soit une plage de résolution allant 1,67 à 31,6 m). L'algorithme calcule alors la moyenne des valeurs de gris des pixels contenus à l'intérieur de chaque fenêtre et ceci pour les trois canaux. Cette moyenne arithmétique des valeurs spectrales des pixels paraît en effet appropriée pour représenter ce processus d'agrégation physique (Marceau *et al.*, 1994b). Il faut cependant remarquer que les données de résolution dégradée obtenues ont une qualité meilleure que des données qui auraient été acquises directement à ce niveau d'agrégation : le procédé ne simule pas la FTM (fonction de transfert de modulation) du capteur et diminue notablement le bruit.

3.3.2 La présentation de l'algorithme

Comme nous avons de nombreux sites pour chacune des classes forestières et que nous devons créer plusieurs fenêtres d'analyse, nous avons développé un algorithme réalisant les agrégations de manière automatisée sur ARC/INFO, (Figure 3.3). Le logiciel ARC/INFO offre, en effet, l'opportunité de créer des programmes ou des macro-commandes avec le langage AML (*Arc Macro Language*). Ces programmes, pouvant être exécutés via le logiciel ARC/INFO, permettent ainsi de mettre à exécution une série de tâches personnalisées et répétitives sur des images de télédétection. La programmation de l'algorithme est décrite en détail à l'annexe 2.

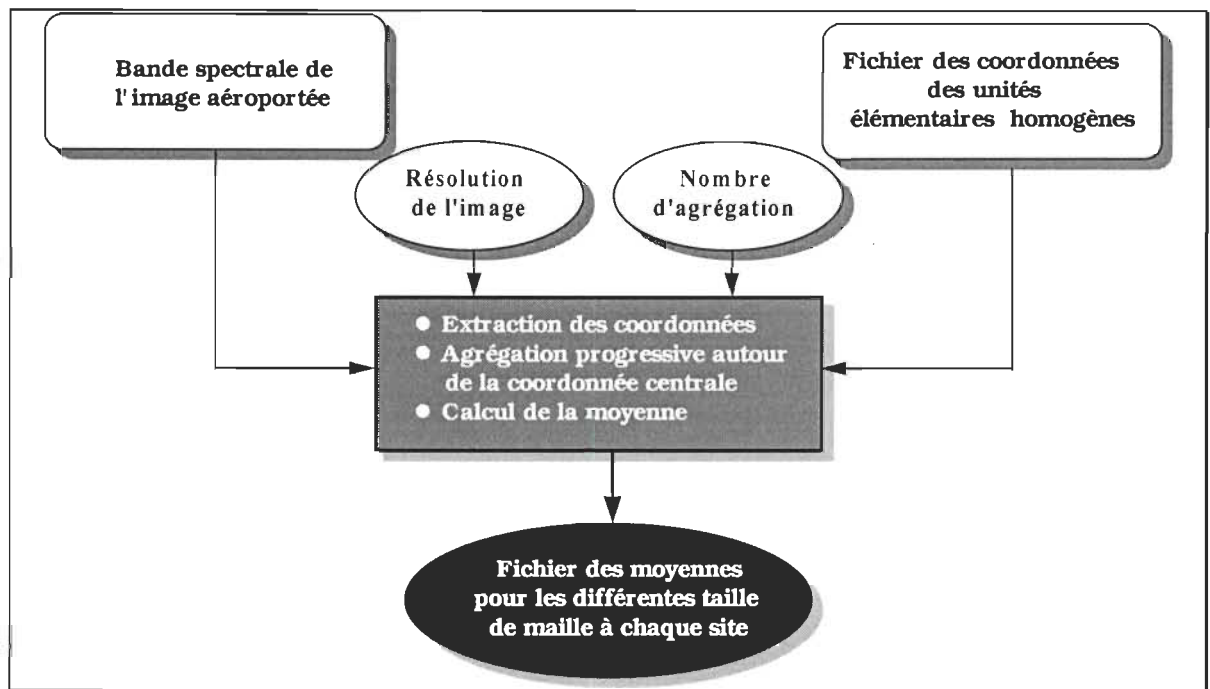


Figure 3.3 L'algorithme d'agrégation spatial de données multispectrales

3.4 L'application du critère d'optimisation sur les séries de données agrégées

Par la suite, les variances spectrales sont calculées (Équation 1) à partir des valeurs des moyennes des six sites retenus pour chacune des résolutions spatiales. La variance minimale pour la majorité des bandes, soit deux bandes sur trois incluant le proche infrarouge, est considérée comme l'indicateur de la résolution spatiale dite optimale.

Équation 1. Le calcul de la variance d'un compte numérique basé sur un échantillon aléatoire simple est exécuté avec l'équation suivante:

$$s^2 = \frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)} \quad (1)$$

3.5 La validation des résultats

Afin de vérifier l'utilité de la résolution spatiale optimale pour la discrimination des peuplements, nous avons analysé la séparabilité spectrale de nos classes forestières de deux façons. D'abord, avec des tests de variance bivariée pour chaque classe forestière considérée à leur résolution spatiale optimale tel que présenté dans l'étude de Marceau *et al.* (1994b), mais également avec des analyses de variance bivariée pour déterminer la séparabilité spectrale d'une classe donnée par rapport à l'ensemble des classes. En effet, même si certains indices de séparabilité tels les divergences transformées moyennes et la distance Jeffreys-Matusita sont mieux adaptés au contexte multidimensionnel des données de télédétection, les résultats obtenus ne sont pas constant avec ceux de la classification (Gong *et al.*, 1992). Les analyses de variance s'avèrent donc utiles pour comparer les variances inter et intra-classes sans toutefois concorder directement avec les résultats de classification. Rappelons que l'intérêt de la résolution spatiale optimale en classification étant d'ajuster la résolution au objets à reconnaître au lieu de développer des algorithmes complexes.

3.5.1 L'analyse de variance bivariée par paires de classe

L'analyse de variance bivariée est un test statistique basé sur le rapport entre la variance d'une classe sur la variance de l'autre (Équation 1).

$$F = \frac{\sigma^2_{\text{Inter}}}{\sigma^2_{\text{Intra}}} = \frac{\text{Variance inter-classe}}{\text{Variance intra-classe}}$$

Lorsque nous appliquons ce test statistique à deux classes forestières, cela nous permet de décider si ces deux classes sont significativement différentes ou non dans l'espace multispectral. Nous avons donc réalisé les tests de variance bivariée pour toutes les paires de classe à l'étude, soit 306 paires pour chacune des trois bandes spectrales. La valeur critique du test, pour un seuil de confiance de 95% et des degrés de liberté de 1

et de 10, est de 4,96. Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats, lorsque la valeur de F est supérieure au seuil de 4,96, celle-ci est annoté du symbole « * » indiquant que les deux classes sont significativement différentes dans cette bande. De plus, afin de déterminer si deux classes ne sont pas significativement différentes, elles doivent être non discriminables dans au moins une des deux bandes du visible (verte ou rouge) et dans la bande du proche infrarouge. Le choix d'au moins une bande ou des deux, s'explique par la forte autocorrélation de la réponse spectrale de la végétation dans la partie visible du spectre électromagnétique. Ces classes étant jugées non discriminables d'un point de vue statistique dans un contexte de classification sont représentées en caractère gras dans les tableaux 4.2 à 4.19. Les tests statistiques portant sur l'analyse de variance bivariée ont été réalisés avec le logiciel SPSS¹.

3.5.2 L'analyse de variance bivariée pour chaque classe par rapport à l'ensemble des classes

Même s'il est essentiel de faire des analyses de variance bivariée pour déterminer la séparabilité spectrale entre deux classes données, toutes les classes sont prises en considération dans l'espace multispectral lorsque nous exécutons une classification. Nous avons donc réalisé des analyses de variance bivariée pour chaque classe par rapport à l'ensemble des classes. Pour un niveau de confiance de 95% et des degrés de liberté de 90 et 17, le seuil critique du test est de 2,025. Lorsque la valeur de F obtenues à partir de l'analyse de variance appliqué aux trois bandes spectrales est supérieur au seuil de 2, ceci nous indique que la classe donnée est significativement différente à cette résolution spatiale par rapport à l'ensemble des classes à l'étude. De plus, en observant nous sommes en mesure de vérifier si la résolution spatiale optimale offre la meilleure discrimination par rapport aux autres résolutions spatiales. Une fois de plus les tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel SPSS¹

¹ voir annexe 3

Chapitre 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le but de ce chapitre est de présenter les différents résultats obtenus dans le cadre de cette recherche portant sur l'application de l'approche de la résolution spatiale optimale dans un environnement forestier complexe. En premier lieu, nous allons procéder à l'interprétation des courbes de la variance spectrale en fonction de la résolution spatiale. Nous identifierons également la résolution spatiale optimale pour chaque classe forestière à l'étude et évaluerons l'influence de chaque paramètre ayant servi à la définition des entités géographiques, notamment ceux dues aux effets de la topographie. En second lieu, nous allons examiner la séparabilité spectrale des classes forestières de deux manières: primo, par l'analyse de variance bivariée pour chacune des paires de classe et secundo, par l'analyse de variance bivariée de chaque classe par rapport à toutes les classes réunies, pour chacune des bandes spectrales.

4.1 Interprétation des courbes de variance en fonction de la résolution spatiale optimale pour la détection des classes forestières

Les figures 4.1 à 4.7 représentent les courbes de variance spectrale en fonction de la résolution spatiale obtenue à l'aide de la méthode de la résolution spatiale optimale pour la forêt des Monts de Lacaune. De façon générale, pour l'ensemble des trois bandes spectrales, la variance intraclasse à 1,67 m de résolution est relativement élevée. Elle diminue ensuite jusqu'à atteindre un minimum à des résolutions intermédiaires, puis remonte légèrement et se stabilise à des résolutions plus grossières. Cette tendance corrobore les résultats présentés dans l'étude de Marceau *et al.* (1994b). En observant le Tableau 4.1 qui nous montre les classes forestières à l'étude, nous constatons que la résolution spatiale optimale correspondant au mélange approprié de couronnes d'arbre,

d'ombre et de sous-bois pour les classes forestières de la zone d'étude varie de 8,3 à 28,3 m.

Tableau 4.1 Classes forestières et résolution spatiale optimale

Classe	Essence	Organisation Spatiale	Structure Forestière	Hauteur (m)	Taux couvert (%)	Pente (%)	Exposition solaire	Nb sites	Résolution Spatiale Optimale
<i>Terrain faible inclinaison</i>									
1	Hêtre	Couvert plein	Taillis	6-10	90-100	0-10	Toutes	18	18,3 m
1a	"	"	"	"	"	"	Opposé	6	18,3 m
1b	"	"	"	"	"	"	Côté	6	18,3 m
1c	"	"	"	"	"	"	Face	6	15 m
2	Feuillus	Couvert plein	Taillis	6-10	90-100	0-10	Toutes	18	25 m
2a	"	"	"	"	"	"	Opposé	6	25 m
2b	"	"	"	"	"	"	Côté	6	25 m
2c	"	"	"	"	"	"	Face	6	21,6 m
3	Épicéa	Adultes couvr.	Futaie	21-25	90-100	0-10	Toutes	18	15 m
3a	"	"	"	"	"	"	Opposé	6	15 m
3b	"	"	"	"	"	"	Côté	6	11,7 m
3c	"	"	"	"	"	"	Face	6	15 m
4	Épicéa	Jeunes couvr.	Futaie	11-15	70-80	0-10	Toutes	18	15 m
4a	"	"	"	"	"	"	Opposé	6	18,3 m
4b	"	"	"	"	"	"	Côté	6	15 m
4c	"	"	"	"	"	"	Face	6	15 m
<i>Terrain pentu</i>									
5a	Hêtre	Couvert plein	Taillis	11-15	90-100	20-30	Opposé	6	8,3 m
5b	"	"	"	6-10	"	"	Face	6	8,3 m
6a	Feuillus	Couvert plein	Taillis	11-15	90-100	20-30	Opposé	6	11,7 m
6b	"	"	"	6-10	"	"	Face	6	18,3 m
7a	Feuillus	Couvert éclairci	Taillis-Futaie	11-15	70-90	20-30	Côté	6	25 m
7b	"	"	"	6-10	"	"	Face	6	28,3 m

4.1.1 L'influence des paramètres forestiers

L'interprétation des courbes de variance en fonction de la résolution spatiale pour les diverses classes forestières à l'étude nous révèle que la résolution spatiale optimale n'est pas nécessairement déterminée par l'essence prédominante. Les peuplements où l'essence prédominante est le hêtre affichent une résolution spatiale optimale variant de 15 m à 18,3 m (classe 1a à 1c) en terrain de faible inclinaison et de 8,3 m en terrain pentu (classe 5a et 5b; Tableau 4.1). Le même phénomène se produit dans le cas des peuplements d'épicéa où la résolution spatiale optimale varie de 11,7 m à 15 m pour les peuplements adultes (classes 3a à 3c) et de 15 m à 18,3 m pour les peuplements jeunes

(classes 4a à 4c; Tableau 4.1). Nous constatons donc que pour un peuplement présentant la même essence prédominante, la résolution spatiale optimale peut effectivement subir des variations en fonction des autres paramètres forestiers et topographiques. Ceci vient appuyer le fait que se sont plutôt les paramètres spatiaux et structuraux qui jouent un plus grand rôle dans la variabilité spectrale du peuplement.

En ce qui concerne l'organisation spatiale, nous pouvons constater que ce paramètre pouvait affecter grandement la résolution spatiale optimale. Les peuplements de feuillus aux couverts éclaircis ayant subi des interventions sylvicoles (classes 7a et 7b; Tableau 4.1) présentent respectivement une résolution spatiale optimale de 25 m et 28,3 m. Par contre, les peuplements de feuillus aux couverts pleins se situant également en terrain pentu (classe 6a et 6b; Tableau 4.1) présentent quant à eux, des résolutions spatiales optimales de 11,7 m et 18,3 m. Cette augmentation de la résolution spatiale optimale dans le premier cas est due au fait que les interventions sylvicoles vont créer un accroissement de la variabilité spectrale du peuplement. En effet, la diminution du taux de couvert et par le même fait l'augmentation de la part de sol nu requiert donc une taille de maille plus grande pour mieux intégrer toutes les variabilités inhérentes à cette entité géographique d'intérêt.

Ce phénomène peut également être observé pour les peuplements d'épicéa (classes 3 et 4; Tableau 4.1). Nous observons une légère variation de la résolution spatiale optimale entre les épicéas adultes couvrants (taux de couvert 90-100%, hauteur 21-25 m) par rapport aux jeunes couvrants (taux de couvert 70-80%, hauteur 11-15 m). Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les bandes de reboisement sont encore visibles dans le cas des jeunes, créant ainsi plus d'ombre portée et donc plus de variabilité spectrale au niveau de l'image. Les paramètres structuraux constituant le peuplement sont donc un facteur important pour expliquer le comportement spatial et spectral.

Pour ce qui est de la structure forestière, nous constatons qu'il est très difficile, de discriminer entre une futaie et un taillis pour un même peuplement forestier dans le cas des feuillus (classe 6a-6b et 7a-7b; Tableau 4.1). Pour ce qui est des paramètres structuraux tels que la hauteur et le taux de couvert (densité), la zone d'étude ne pouvait pas nous offrir différents types de hauteur et de densité pour un même peuplement nous permettant d'observer leur impact. Néanmoins, les résultats de cette étude confirment que les paramètres spatiaux et structuraux jouent un grand rôle dans la variabilité spectrale du peuplement ainsi que sur la résolution spatiale optimale.

4.1.2 L'influence des paramètres topographiques

En examinant l'influence des paramètres topographiques sur les différents peuplements à l'étude, nous observons une diminution sensible de la résolution spatiale optimale des peuplements se situant en terrain pentu (20-30%) par rapport à ceux se situant en terrain de faible inclinaison (0-10%). Lorsque le peuplement de hêtres se retrouve en situation de terrain de faible inclinaison et d'exposition de face (classe 1c), sa résolution spatiale optimale est de 15m (Tableau 4.1, Figure 4.1). Par contre, lorsque l'on retrouve le peuplement possédant les mêmes paramètres forestiers et la même exposition, soit de face, mais se situant en terrain pentu (classe 5b), sa résolution spatiale optimale est alors de 8,3 m (Tableau 4.1, Figure 4.6).

La même situation peut être observée pour le peuplement de feuillus; la classe 2c, terrain de faible inclinaison et exposition de face, affiche une résolution spatiale optimale de 21.6 m (Figure 4.2). Cependant, lorsque ce peuplement de feuillus se retrouve en terrain pentu (classe 6b), la résolution spatiale optimale diminue alors jusqu'à 18,3 m (Figure 4.6). Dans l'un des deux cas nous avons observé une diminution importante de la résolution spatiale optimale en fonction de la pente qui pouvait être de l'ordre de 7 m. Ces résultats nous suggèrent que la pente affecte de façon significative la résolution spatiale optimale. Par ailleurs, en observant les résultats, nous constatons que,

contrairement à la pente, l'exposition solaire influence de façon moins prononcée la résolution spatiale optimale.

Dans certains cas, l'exposition a entraîné des variations de la résolution spatiale optimale pour les peuplements caractérisés par un terrain pentu (20-30%; Tableau 4.1). Il apparaît, que l'exposition opposée et de face (classes 6a et 6b), entraîne une variation de la résolution spatiale optimale de 11,7 m à 18,3 m respectivement (Tableau 4.1). Pour le peuplement de feuillus à couvert éclairci (classe 7a et 7b, Tableau 4.1) on observe par ailleurs une variation de 25 m pour l'exposition de côté à 28,3 m pour l'exposition de face. L'influence de l'exposition solaire semble toutefois moins prononcée que celui de la pente. Le rôle de l'exposition solaire est moins prononcé lorsque les peuplements de feuillus et de conifères se situent en terrain de faible inclinaison. En ce qui concerne les peuplements caractérisés par un terrain plus pentu, nous constatons que l'influence de l'exposition entraîne des variations de la résolution spatiale optimale dans certains cas. Il apparaît donc que les paramètres topographiques, particulièrement la pente, doivent être pris en considération dans la définition des entités géographiques d'intérêt lorsque le peuplement se trouve en situation de topographie accidentée. Dans ces conditions topographiques, la pente peut, dans certains cas, s'avérer plus importante que les paramètres structuraux du peuplement tel la hauteur et la densité.

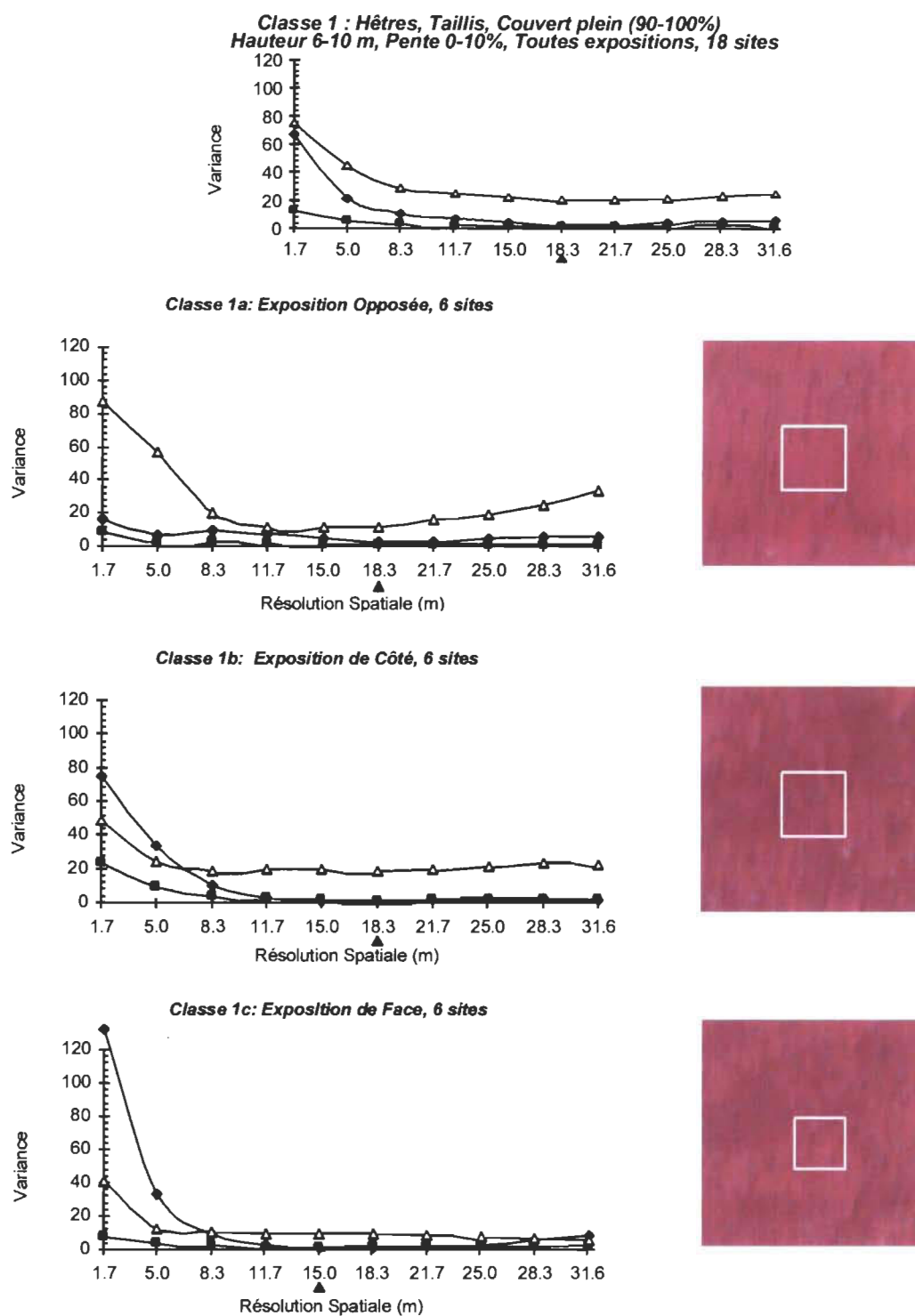


Figure 4.1 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 1, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8); Monts de Lacaune (Tarn, France), Juin 1994.

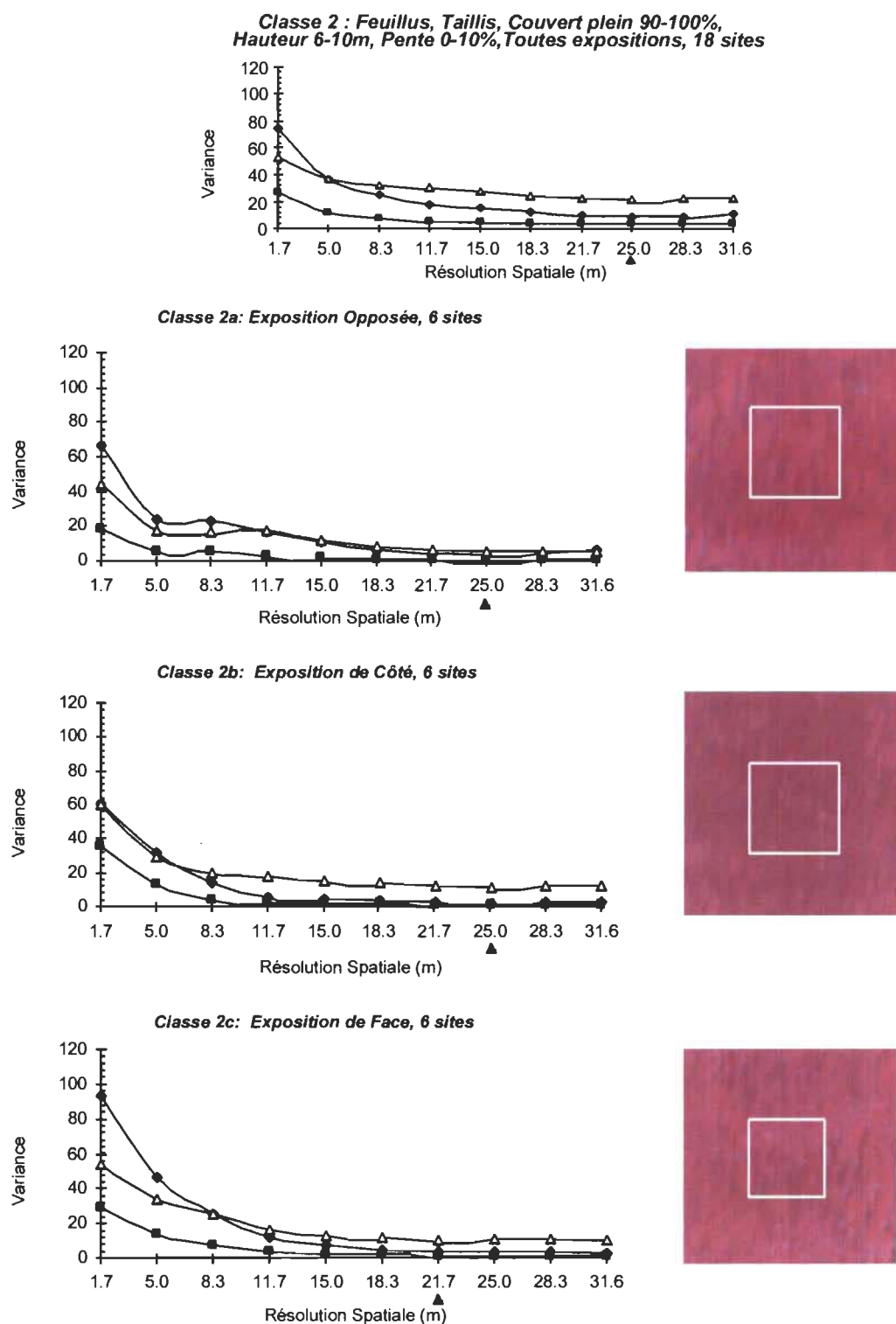


Figure 4.2 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 2, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8); Monts de Lacaune (Tarn, France), Juin 1994.

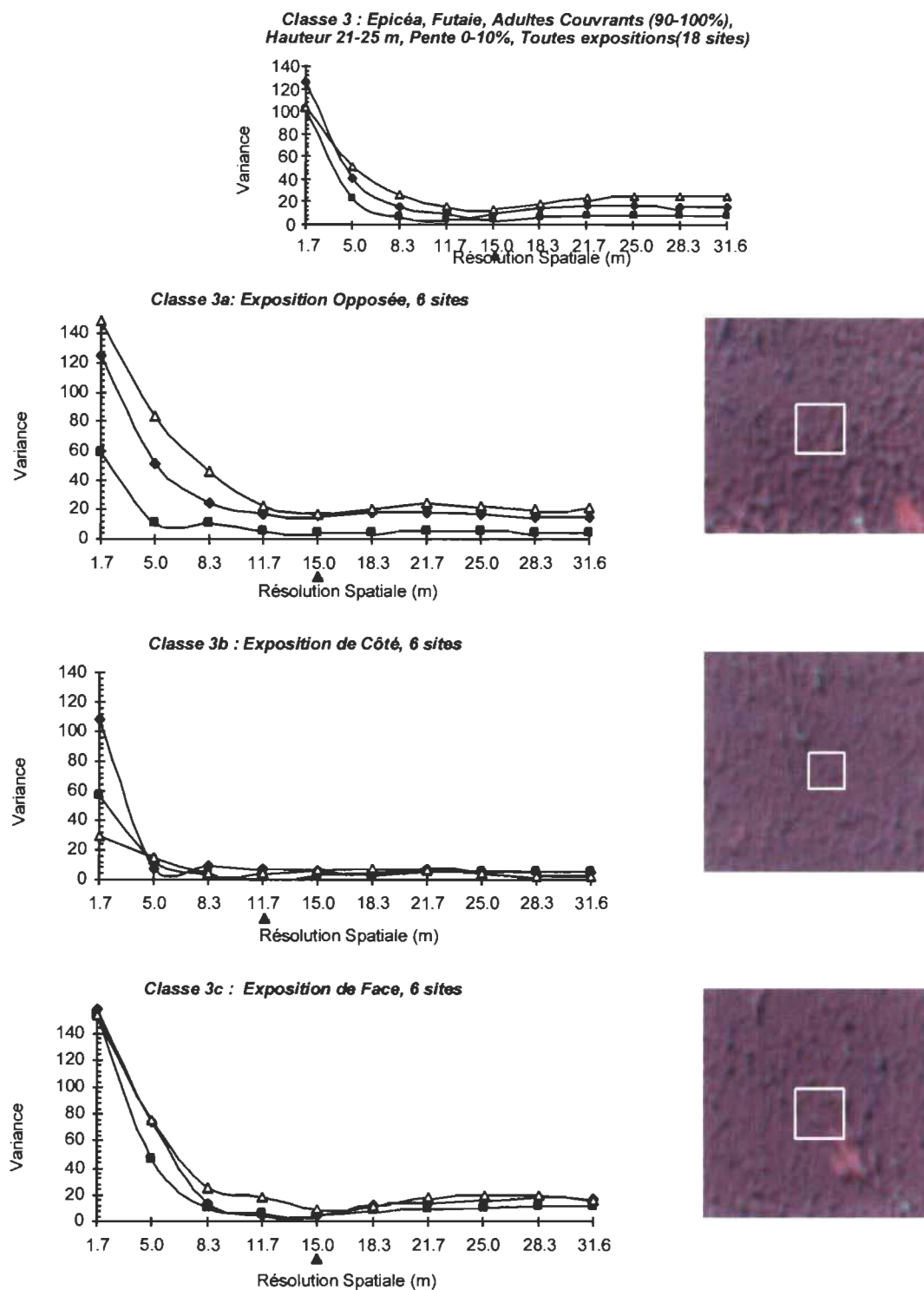


Figure 4.3 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 3, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8); Monts de Lacaune (Tarn, France), Juin 1994.

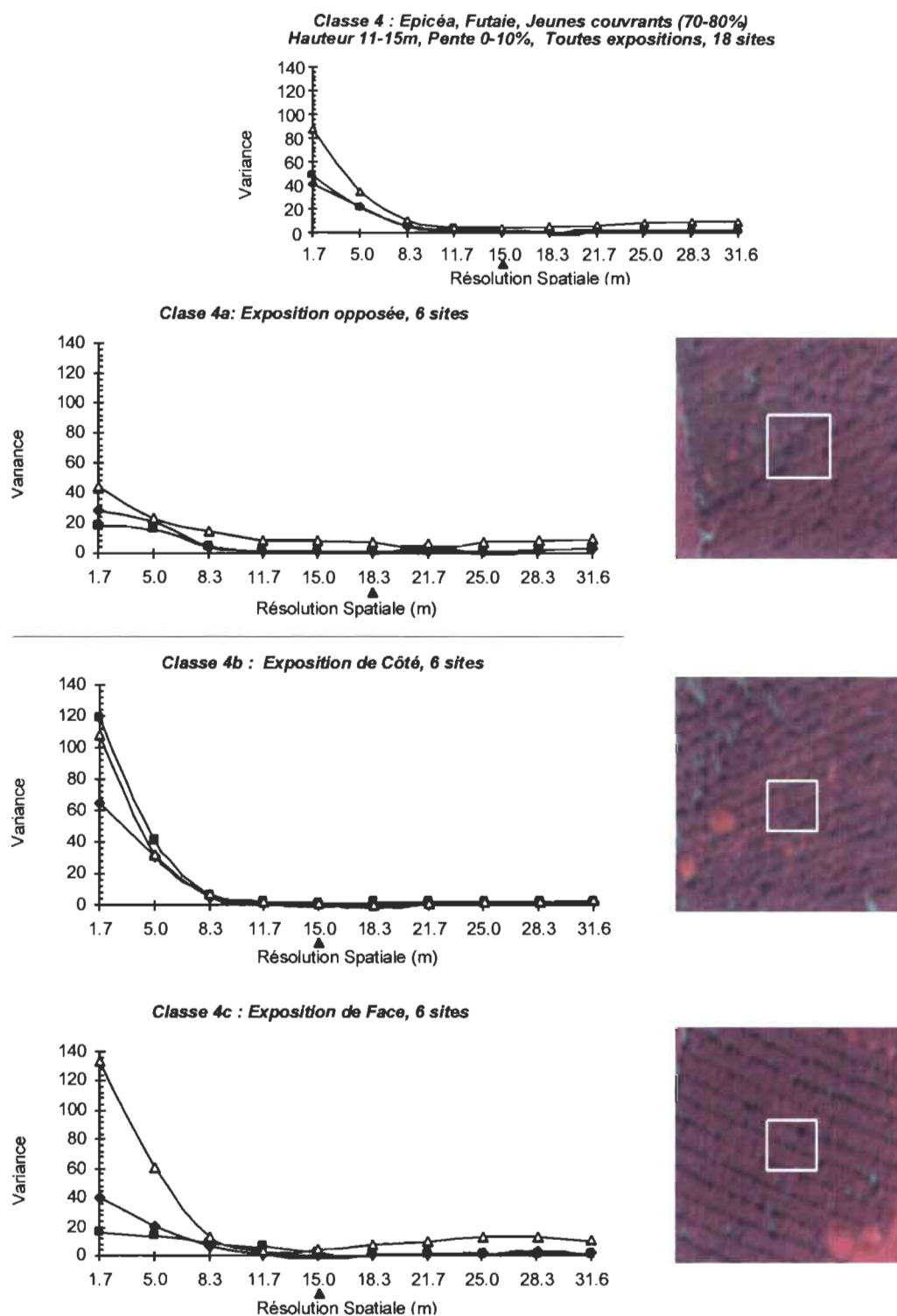


Figure 4.4 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 4, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8) Monts de Lacune (Tarn, France), Juin 1994.

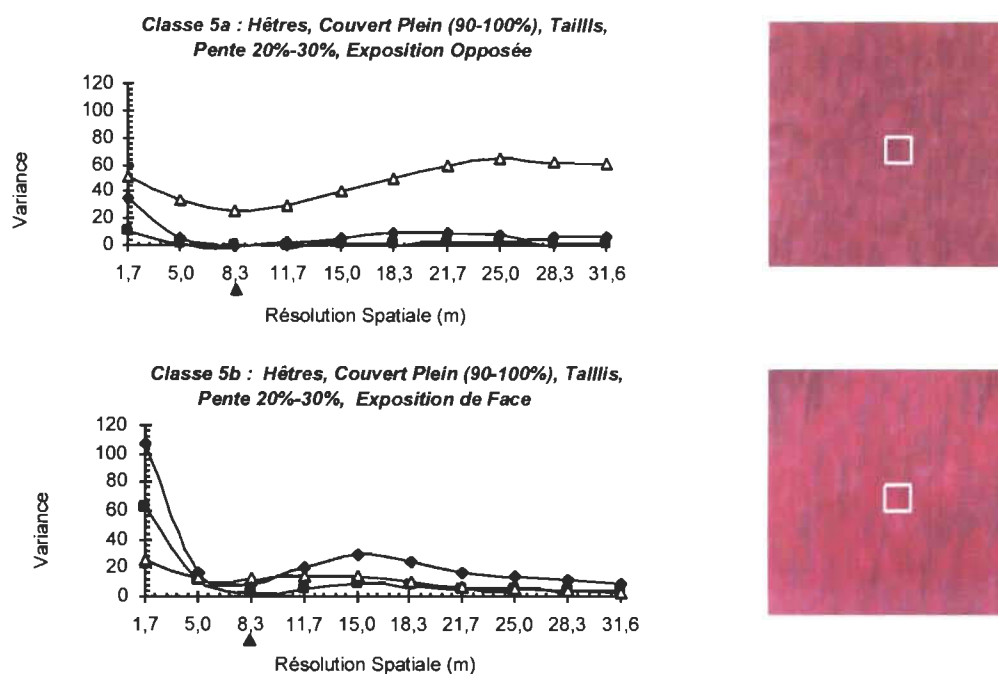


Figure 4.5 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 5, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8)

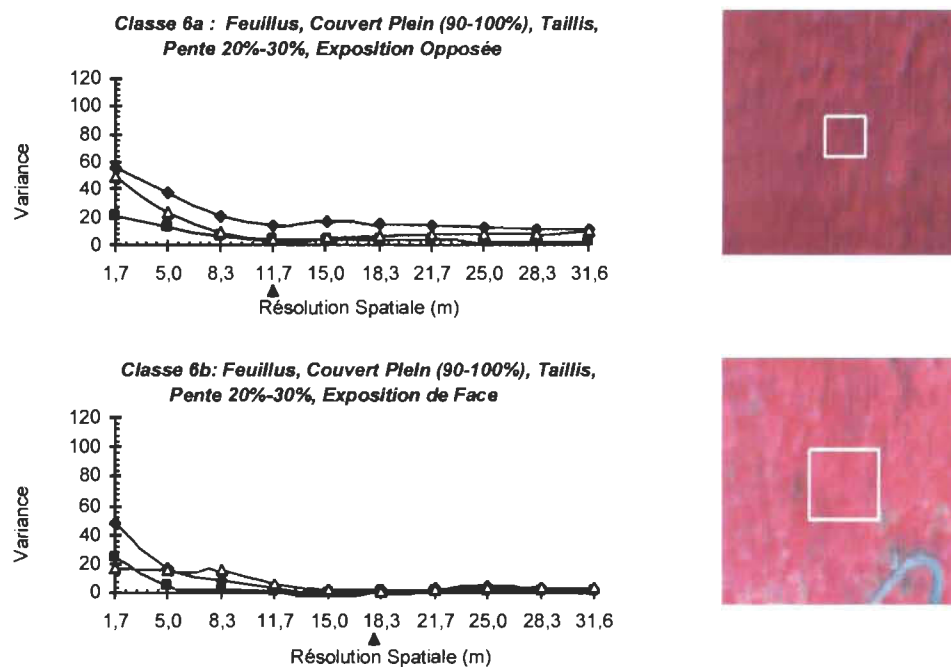


Figure 4.6 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 6, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8)
Monts de Lacaune (Tarn, France), Juin 1994.

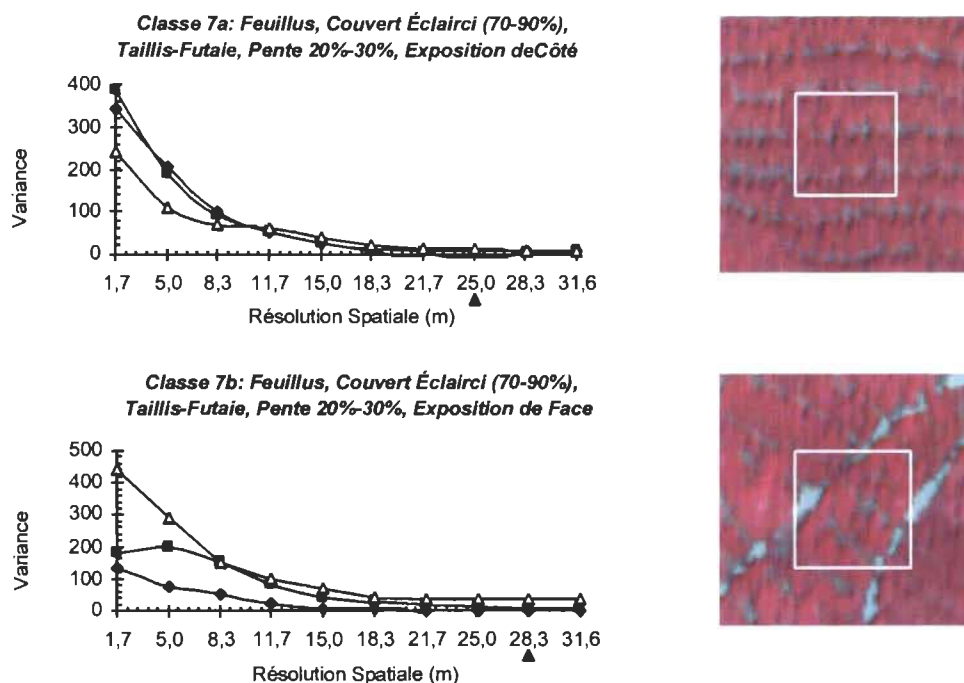


Figure 4.7 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 7, et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour chaque type d'exposition solaire (voir légende Figure 4.8) Monts de Lacaune (Tarn, France), Juin 1994.

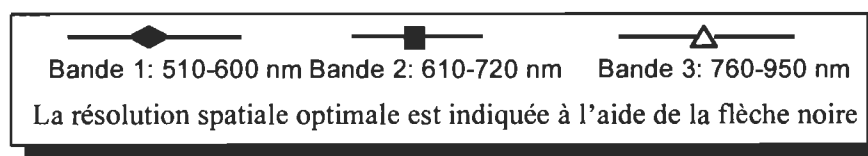


Figure 4.8 Légende des graphiques portant sur la variance spectrale en fonction de la résolution spatiale.

4.2 La résolution spatiale optimale et la discrimination des classes forestières

4.2.1 La séparabilité spectrale entre paires de classes

A l'exception de 14 paires, l'ensemble des 306 paires de classes possibles dans le cadre de cette étude se sont avérées discriminables dans la bande spectrale du proche infrarouge et dans au moins une bande du visible. La plupart de la confusion spectrale est relevée pour les peuplements ayant la même essence prédominante, les mêmes paramètres forestiers et se situant en terrain de faible inclinaison (0-10%). Par exemple, on constate que la classe 1c n'est pas discriminable par rapport à la classe 1b (exposition de côté) dans les bandes du rouge et proche infrarouge pour les peuplements de hêtres se situant en terrain de faible inclinaison (Tableau 4.4). De plus, la classe 1c présente une confusion spectrale par rapport à la classe 1a dans les bandes du visible mais est toutefois discriminable au niveau du proche infrarouge (Tableau 4.4). En ce qui concerne les classes forestières se situant en topographie accidentée (pente de 20-30%), on constate que la discrimination entre les paires de classe est excellente. En effet, des six classes se retrouvant dans ces conditions topographiques quatre d'entre elles (5a, 5b, 7a et 7b) ne présentent aucune confusion dans au moins deux bandes spectrales sur trois par rapport à l'ensemble de toutes les classes à l'étude, les deux autres (6a et 6b) ne présentant de confusion que dans un cas seulement.

La séparabilité spectrale entre les différentes paires de classe montre que la plupart de la confusion spectrale est relevée pour les classes en terrain de faible inclinaison ayant la même essence prédominante et les mêmes paramètres forestiers. Quand la pente est faible, les paramètres topographiques influence peu la variabilité du peuplement. Ceux-ci sont donc négligeables dans la définition des entités géographiques d'intérêt se trouvant dans ces conditions. Par contre, en ce qui concerne les classes forestières se situant en topographie accidentée, les résultats confirment l'importance des paramètres

topographiques tels que la pente et l'exposition solaire. En effet, ceux-ci démontrent non seulement une variation au niveau de la résolution spatiale optimale mais permettent également une excellente discrimination spectrale.

Tableau 4.2. Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 1a.

Classe 1a : Hêtre, Couvert Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition opposée
Résolution Spatiale optimale: 18,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1b	10.320*	7.258*	7.533*
1c	2.057	0.443	9.135*
2a	14.115*	104.906*	16.840*
2b	3.567	49.989*	12.847*
2c	2.826	9.018*	0.038
3a	65.296*	31.700*	1154.473*
3b	193.094*	62.608*	2068.714*
3c	54.935*	7.001*	1398.601*
4a	1175.355*	592.257*	1410.120*
4b	1066.172*	523.281*	3520.736*
4c	1894.048*	537.160*	2119.174*
5a	81.389*	148.790*	11.971*
5b	42.815*	57.159*	78.650*
6a	37.461*	17.288*	37.396*
6b	76.433*	207.390*	15.133*
7a	7.958*	4.647	75.416*
7b	38.148*	21.859*	0.735

Tableau 4.3 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 1b.

Classe 1b : Hêtre, Couvert Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition côté
Résolution Spatiale optimale: 18,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	10.320*	7.258*	7.533*
1c	4.742	2.753	0.050
2a	40.000*	137.553*	41.722*
2b	24.717*	77.846*	34.014*
2c	0.518	26.119*	6.681*
3a	96.668*	49.195*	1101.317*
3b	311.012*	88.051*	1745.372*
3c	90.625*	15.219*	1265.503*
4a	2346.824*	586.558*	1273.600*
4b	2001.831*	538.400*	2576.887*
4c	2190.990*	537.672*	1804.588*
5a	135.285*	181.268*	26.120*
5b	29.745*	36.574*	23.979*
6a	23.223*	5.003*	5.024*
6b	176.903*	236.350*	42.403*
7a	22.124*	0.611	105.928*
7b	18.452*	15.562*	7.465*

Tableau 4.4 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 1c.

Classe 1c : Hêtre, Couvert Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 15 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	2.670	1.125	10.361*
1b	8.153*	3.991	0.222
2a	20.372*	79.785*	49.091*
2b	14.362*	58.299*	40.293*
2c	0.209	10.322*	6.840*
3a	93.034*	40.899*	1594.382*
3b	258.638*	62.898*	2775.913*
3c	197.773*	19.216*	2023.077*
4a	2164.440*	584.907*	2710.909*
4b	2136.270*	653.485*	4686.086*
4c	2466.654*	330.675*	3418.288*
5a	169.171*	226.677*	35.527*
5b	32.525*	50.890*	28.889*
6a	28.371*	11.286*	8.446*
6b	148.523*	233.466*	67.384*
7a	6.081*	2.047	82.707*
7b	19.622*	14.612*	5.163*

Tableau 4.5 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 2a.

Classe 2a : Feuillus, Couv. Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition opposée
Résolution Spatiale optimale: 25 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	9.199*	75.008*	9.032*
1b	34.789*	86.499*	27.975*
1c	16.793*	46.514*	68.367*
2b	2.839	2.475	0.379
2c	29.351*	40.300*	17.402*
3a	34.946*	0.004	1075.327*
3b	99.400*	0.520	3398.832*
3c	17.658*	3.332	996.866*
4a	579.045*	145.021*	2807.791*
4b	533.939*	103.679*	4713.205*
4c	442.604*	110.744*	1815.410*
5a	37.357*	14.909*	1.265
5b	97.617*	200.144*	343.413*
6a	63.248*	187.022*	139.557*
6b	15.485*	6.591*	1.362
7a	0.949	92.346*	59.874*
7b	141.452*	118.179*	1.905

Tableau 4.6 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 2b.

Classe 2b : Feuillus, Couvert Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition côté
Résolution Spatiale optimale: 25 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	3.277	57.383*	10.170*
1b	24.916*	70.294*	27.986*
1c	8.540*	34.581*	57.121*
2a	2.839	2.475	0.379
2c	19.839*	25.552*	17.653*
3a	49.868*	0.879	875.106*
3b	151.720*	2.500	2109.107*
3c	28.215*	1.468	798.775*
4a	956.526*	190.535*	1938.519*
4b	880.543*	137.051*	2654.541*
4c	704.608*	144.521*	1367.615*
5a	61.908*	27.804*	0.621
5b	87.801*	182.784*	245.599*
6a	54.7558	166.546*	111.451*
6b	33.561*	16.548*	2.535
7a	5.409*	76.170*	39.636*
7b	156.176*	107.287*	2.815

Tableau 4.7 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 2c.

Classe 2c : Feuillus, Couv. Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10m, Pente 0-10%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 21,6 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	3.851	9.875*	0.024
1b	0.157	24.632*	5.981*
1c	1.168	8.330*	9.283*
2a	30.467*	50.876*	18.704*
2b	15.965*	17.589*	16.597*
3a	77.974*	11.551*	1067.338*
3b	195.566*	18.977*	2393.672*
3c	59.495*	0.566	1129.023*
4a	1068.391*	283.003*	2599.846*
4b	924.766*	259.106*	3779.421*
4c	870.249*	308.824*	3211.078*
5a	93.822*	64.604*	10.067*
5b	42.275*	103.032*	106.584*
6a	29.040*	44.592*	37.516*
6b	89.786*	90.030*	16.368*
7a	21.679*	26.342*	99.233*
7b	25.412*	43.816*	1.448

Tableau 4.8 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 3a.

Classe 3a : Épicéa, Adult. couv. 90-100%, Futaie, Hauteur 21-25m, Pente 0-10%, Exposition opposée
Résolution Spatiale optimale: 15 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	64.199*	31.895*	1297.218*
1b	115.942*	54.909*	1198.370*
1c	93.034*	40.899*	1594.382*
2a	22.945*	0.031	1029.280*
2b	48.116*	1.280	936.539*
2c	74.623*	13.083*	1242.135*
3b	0.235	0.085	0.728
3c	1.647	2.569	1.957
4a	44.031*	68.736*	13.745*
4b	42.978*	84.299*	14.210*
4c	35.059*	41.844*	10.841*
5a	1.450	8.744*	457.137*
5b	113.747*	106.700*	1762.364*
6a	120.385*	59.484*	2099.034*
6b	12.330*	4.615	1624.606*
7a	18.901*	16.572*	345.329*
7b	120.732*	34.685*	409.382*

Tableau 4.9 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 3b.

Classe 3b : Épicéa, Adult. couv. 90-100%, Futaie, Hauteur 21-25m, Pente 0-10%, Exposition côté
Résolution Spatiale optimale: 11,7 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	97.341*	35.417*	2281.500*
1b	223.358*	67.249*	1929.376*
1c	174.624*	58.189*	3042.240*
2a	30.005*	0.085	1395.200*
2b	80.948*	0.754	1381.900*
2c	94.619*	13.217*	1811.144*
3a	0.000	0.016	0.100
3c	3.310	1.833	2.658
4a	96.858*	108.372*	20.543*
4b	87.469*	117.956*	27.190*
4c	62.498*	27.774*	23.344*
5a	2.289	25.230*	785.737*
5b	200.907*	167.789*	2891.255*
6a	193.012*	80.776*	5300.201*
6b	23.631*	8.789*	2960.117*
7a	17.063*	11.951*	289.009*
7b	95.482*	16.761*	350.610*

Tableau 4.10 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 3c.

Classe 3c : Épicéa, Adult. couv. 90-100%, Futaie, Hauteur 21-25m, Pente 0-10%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 15 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	101.705*	13.368*	1604.532*
1b	262.471*	30.292*	1387.778*
1c	197.773*	19.216*	2023.077*
2a	23.403*	4.292	1249.416*
2b	72.404*	0.682	1101.839*
2c	108.791*	3.111	1505.210*
3a	1.647	2.569	1.957
3b	6.345*	4.227	8.058*
4a	199.504*	107.939*	36.370*
4b	195.379*	127.251*	50.681*
4c	176.085*	70.426*	35.277*
5a	0.005	25.102*	475.394*
5b	128.479*	81.143*	2153.619*
6a	152.046*	37.415*	2861.938*
6b	11.788*	18.372*	2360.044*
7a	16.360*	10.302*	354.450*
7b	185.897*	26.947*	412.873*

Tableau 4.11 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 4a.

Classe 4a : Épicéa, Jeun. couv. 70-80%, Futaie, Hauteur 11-15 m, Pente 0-10%, Exposition opposée
Résolution Spatiale optimale: 18,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	1175.355*	592.257*	1410.120*
1b	2346.824*	586.558*	1273.600*
1c	2090.577*	420.073*	1800.233*
2a	364.139*	179.985*	1365.218*
2b	763.937*	203.564*	1049.792*
2c	826.702*	323.391*	1441.046*
3a	40.227*	63.254*	3.042
3b	88.306*	76.108*	12.254*
3c	95.570*	70.534*	0.000
4b	0.011	3.290	55.843*
4c	4.169	1.387	27.150*
5a	116.088*	51.114*	388.583*
5b	378.848*	339.844*	2289.984*
6a	484.336*	351.406*	2314.233*
6b	536.562*	123.966*	2123.431*
7a	215.948*	171.351*	545.363*
7b	1078.682*	107.277*	558.420*

Tableau 4.12 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 4b.

Classe 4b : Épicéa, Jeun. couv. 70-80%, Futaie, Hauteur 11-15 m, Pente 0-10%, Exposition côté
Résolution Spatiale optimale: 15 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	760.901*	561.072*	3552.337*
1b	2768.034*	598.493*	2494.417*
1c	2136.270*	653.485*	4686.086*
2a	235.503*	151.801*	2747.467*
2b	667.838*	236.378*	2220.802*
2c	598.165*	304.271*	3126.004*
3a	42.978*	84.299*	14.210*
3b	93.631*	109.546*	20.135*
3c	195.379*	127.251*	50.681*
4a	0.063	2.342	0.948
4c	7.054*	8.954*	0.062
5a	160.774*	103.512*	759.612*
5b	326.358*	367.048*	367.048*
6a	461.777*	370.681*	8490.498*
6b	480.251*	174.108*	11621.866*
7a	118.059*	71.088*	592.023*
7b	781.247*	88.081*	595.301*

Tableau 4.13 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 4c.

Classe 4c : Épicéa, Jeun. couv. 70-80%, Futaie, Hauteur 11-15 m, Pente 0-10%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 15 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	755.094*	285.198*	2683.057*
1b	3339.439*	335.703*	2086.761*
1c	2466.654*	330.675*	3418.288*
2a	218.004*	65.774*	2110.082*
2b	659.331*	106.773*	1786.916*
2c	580.601*	162.508*	2442.709*
3a	35.059*	41.844*	10.841*
3b	77.999*	50.101*	11.662*
3c	176.085*	70.426*	35.277*
4a	8.745*	3.070	0.956
4b	7.054*	8.954*	0.062
5a	142.657*	29.699*	692.188*
5b	311.845*	277.763*	3348.510*
6a	443.282*	246.651*	5293.496*
6b	471.661*	52.349*	5270.473*
7a	107.613*	53.790*	538.366*
7b	766.062*	72.612*	560.652*

Tableau 4.14 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 5a.

Classe 5a : Hêtre, Couv. Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 11-15 m, Pente 20-30%, Exposition opposée
Résolution Spatiale optimale: 8,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	164.077*	159.411*	21.104*
1b	242.759*	226.207*	61.863*
1c	172.282*	225.966*	59.535*
2a	28.347*	18.838*	4.753
2b	63.608*	32.977*	7.376*
2c	61.942*	44.280*	23.265*
3a	0.314	13.653*	357.104*
3b	0.094	58.784*	827.987*
3c	1.722	18.850*	452.857*
4a	187.455*	25.052*	797.461*
4b	154.160*	21.930*	939.682*
4c	100.394*	3.889	792.927*
5b	498.957*	643.681*	142.685*
6a	191.447*	178.550*	82.413*
6b	25.935*	8.963*	6.680*
7a	7.540*	11.640*	2.653
7b	42.857*	12.742*	4.080

Tableau 4.15 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 5b.

Classe 5b : Hêtre, Couv. Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10 m, Pente 20-30%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 8,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	65.923*	93.007*	57.489*
1b	36.654*	48.818*	14.311*
1c	41.809*	73.790*	36.759*
2a	61.532*	161.223*	122.160*
2b	71.925*	163.395*	95.479*
2c	26.629*	70.124*	41.232*
3a	157.480*	86.215*	938.843*
3b	264.997*	94.271*	3183.358*
3c	184.979*	74.300*	1347.043*
4a	740.829*	434.361*	2395.118*
4b	693.656*	383.889*	3212.037*
4c	597.788*	225.548*	2441.490*
5a	498.957*	643.681*	142.685*
6a	1.620	18.440*	19.839*
6b	172.674*	301.957*	116.644*
7a	17.082*	2.086	96.683*
7b	9.580*	0.032	13.656*

Tableau 4.16 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 6a.

Classe 6a : Feuillus, Couv. Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 11-15 m, Pente 20-30%, Expo. opposée
Résolution Spatiale optimale: 11,7 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	34.940*	18.862*	37.411*
1b	16.777*	2.727	0.961
1c	28.544*	13.230*	5.819*
2a	46.230*	76.589*	76.657*
2b	52.897*	74.171*	68.244*
2c	18.418*	27.148*	20.770*
3a	133.218*	60.221*	1692.795*
3b	193.012*	80.776*	5300.201*
3c	184.164*	37.326*	1935.167*
4a	551.366*	343.451*	4222.228*
4b	535.655*	356.503*	8590.070*
4c	478.150*	144.598*	7098.743*
5a	203.805*	220.561*	85.129*
5b	2.134	19.621*	15.368*
6b	126.995*	160.865*	138.451*
7a	16.018*	0.116	86.437*
7b	4.699	2.406	8.222*

Tableau 4.17 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 6b.

Classe 6b : Feuillus, Couvert Plein 90-100%, Taillis, Hauteur 6-10 m, Pente 20-30%, Expo. face
Résolution Spatiale optimale: 18,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	76.433*	207.390*	15.133*
1b	176.903*	236.350*	42.403*
1c	132.336*	148.646*	70.871*
2a	8.204*	10.413*	1.681
2b	37.105*	26.179*	0.996
2c	81.787*	83.142*	17.557*
3a	12.809*	4.049	1457.486*
3b	46.447*	2.117	3914.717*
3c	4.574	12.767*	2093.450*
4a	536.562*	123.966*	2123.431*
4b	488.594*	130.453*	18305.295*
4c	476.734*	98.194*	3788.916*
5a	9.033*	1.867	3.252
5b	108.725*	189.822*	265.101*
6a	116.637*	157.440*	191.237*
7a	5.977*	69.840*	55.839*
7b	177.109*	61.991*	1.372

Tableau 4.18 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 7a.

Classe 7a : Feuillus, Couvert éclairci 70-90%, Hauteur 11-15 m, Pente 0-10%, Exposition côté
Résolution Spatiale optimale: 25 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	11.550*	8.090*	71.236*
1b	31.118*	0.324	106.228*
1c	17.672*	4.166	199.056*
2a	0.949	92.346*	59.874*
2b	5.409*	76.170*	39.636*
2c	27.748*	27.758*	101.172*
3a	22.453*	42.128*	560.415*
3b	55.504*	48.341*	1298.992*
3c	9.939*	10.049*	491.798*
4a	285.798*	344.447*	1250.247*
4b	264.075*	280.684*	1634.920*
4c	227.481*	288.284*	881.615*
5a	19.317*	136.321*	7.625*
5b	92.718*	39.949*	498.565*
6a	63.584*	7.686*	287.930*
6b	5.546*	121.589*	85.290*
7b	93.497*	31.505*	39.161*

Tableau 4.19 Valeurs de F obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux 3 bandes spectrales de l'image numérique aéroportée pour la classe forestière 7b.

Classe 7b : Feuillus, Couvert éclairci 70-90%, Hauteur 6-10 m, Pente 0-10%, Exposition face
Résolution Spatiale optimale: 28,3 m

Classe	Bande 1 (Vert) 510-600 nm	Bande 2 (Rouge) 610-720 nm	Bande 3 (PIR) 760-950 nm
1a	50.253*	110.425*	1.263
1b	45.531*	68.522*	7.648*
1c	45.748*	87.871*	13.159*
2a	146.151*	258.077*	1.247
2b	202.274*	218.131*	2.221
2c	34.840*	143.500*	2.208
3a	193.780*	165.696*	614.456*
3b	680.549*	168.755*	971.417*
3c	109.472*	68.796*	525.567*
4a	3627.314*	462.054*	958.568*
4b	2943.950*	485.460*	1060.883*
4c	2000.638*	519.365*	783.775*
5a	351.916*	301.523*	2.734
5b	25.928*	2.695	77.703*
6a	12.752*	32.853*	32.035*
6b	307.695*	307.695*	0.245
7a	94.068*	43.2878	39.180*

4.2.2 La séparabilité spectrale de chaque classe par rapport à l'ensemble des classes

En observant les résultats présentés de la figure 4.9 à 4.11 pour chacune des résolutions spatiales, nous sommes en mesure de vérifier quelle résolution offre la meilleure séparabilité et par le fait même, de vérifier si la résolution spatiale optimale offre la meilleure discrimination par rapport aux autres résolutions spatiales. Dans un premier temps, les courbes représentant les valeurs de F de chaque bande spectrale en fonction de la résolution spatiale sont conformes à ce qui était attendu. En effet, la séparabilité spectrale de chaque classe donnée par rapport à l'ensemble des autres classes à l'étude a tendance à être relativement faible à des résolutions spatiales plus fines. Par la suite, la séparabilité augmente jusqu'à atteindre une discrimination maximale au niveau de la résolution spatiale optimale comme nous pouvons le voir, par exemple, pour les classes 3 (Figure 4.9), 6b (Figure 4.10) et 7b (Figure 4.11). Ceci vient donc confirmer l'importance du concept de résolution spatiale optimale pour la discrimination des peuplements forestiers. Par ailleurs, en observant les différentes courbes, nous constatons que, hormis pour les classes 5a et 7b, la bande spectrale du proche infrarouge (760-950 nm) favorise de façon plus importante la discrimination des peuplements forestiers par rapport aux bandes du visible celles du vert (510-600 nm) et du rouge (610-720 nm), ces dernières étant fortement autocorrélées.

L'examen des analyses de variance d'une classe donnée par rapport à l'ensemble des autres classes révèle que toutes les classes sont significativement différentes dans un contexte de classification, mais que la discrimination atteint toutefois un maximum de séparabilité à la résolution spatiale optimale ou très près. Les résultats démontrent également que la bande spectrale du proche infrarouge favorise de façon plus importante la discrimination des peuplements forestiers par rapport aux bandes vert et rouge.

En conclusion, nos résultats indiquent que le concept de la résolution spatiale optimale démontre le lien qui existe entre la définition des entités géographiques d'intérêt et l'échelle de mesure. Cela confirme la nécessité de choisir la résolution spatiale optimale dans toutes études où nous devons manipuler des données à caractère géographique. Cette recherche a également montré que les graphiques représentant les courbes de variance en fonction de la résolution spatiale pour les différentes bandes spectrales nous donnent plusieurs informations statistiques pouvant mieux guider le choix des méthodes de classification d'image. Enfin, nous sommes en mesure d'affirmer que, pour un peuplement forestier présentant *a priori* les mêmes caractéristiques structurales, nous devons inclure de nouveaux paramètres topographiques dans sa définition pour parler désormais d'une autre entité géographique si celui-ci se trouve en situation de topographie accidentée. Ainsi, en améliorant la définition des entités géographiques (par la prise en compte des paramètres topographiques) et en choisissant la résolution spatiale appropriée (résolution spatiale optimale), la détection et la discrimination des peuplements forestiers devraient s'avérer maximales lors de la classification des images numériques de télédétection.

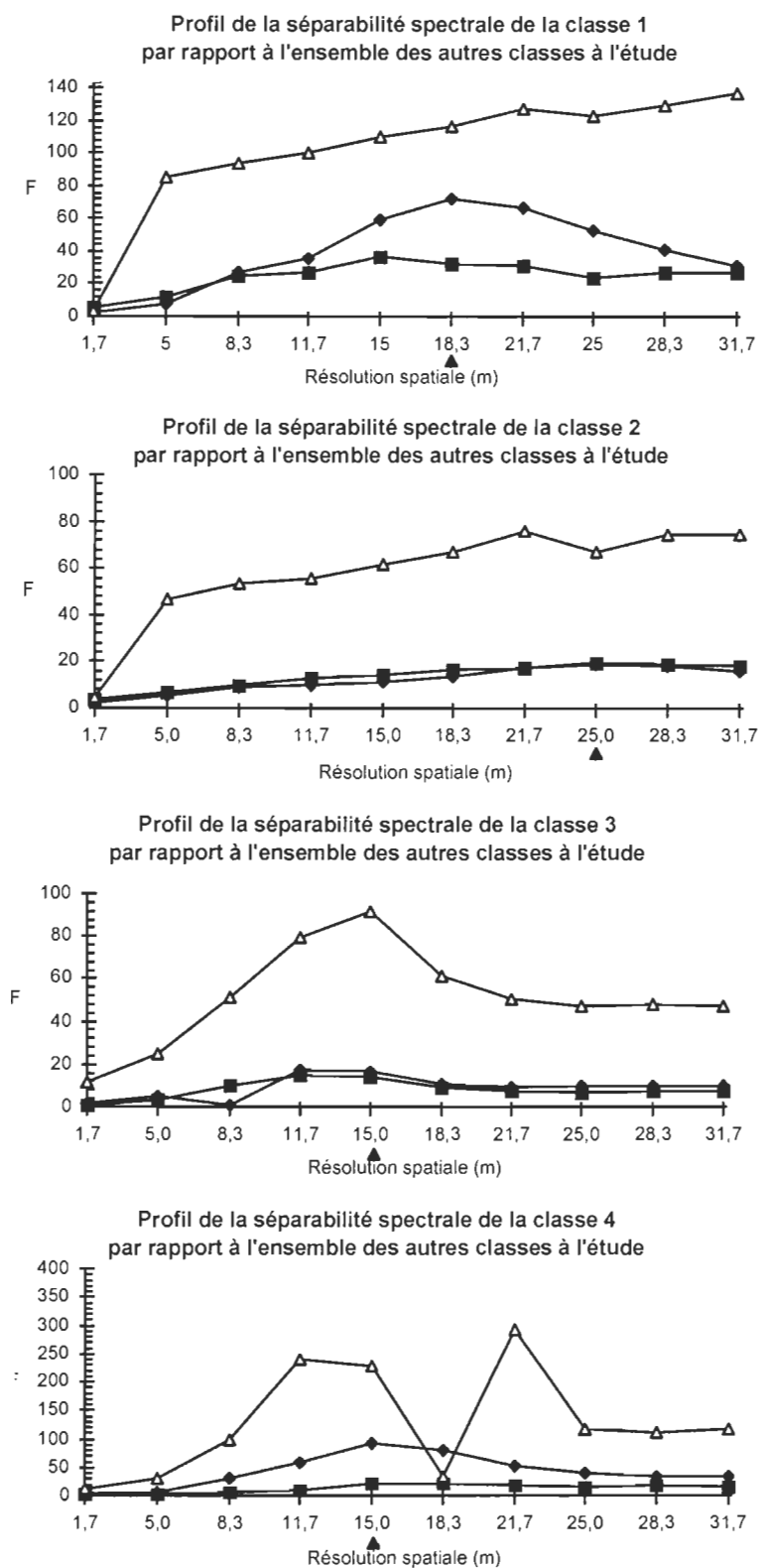


Figure 4.9 Profils de la séparabilité spectrale pour les classes 1 à 4

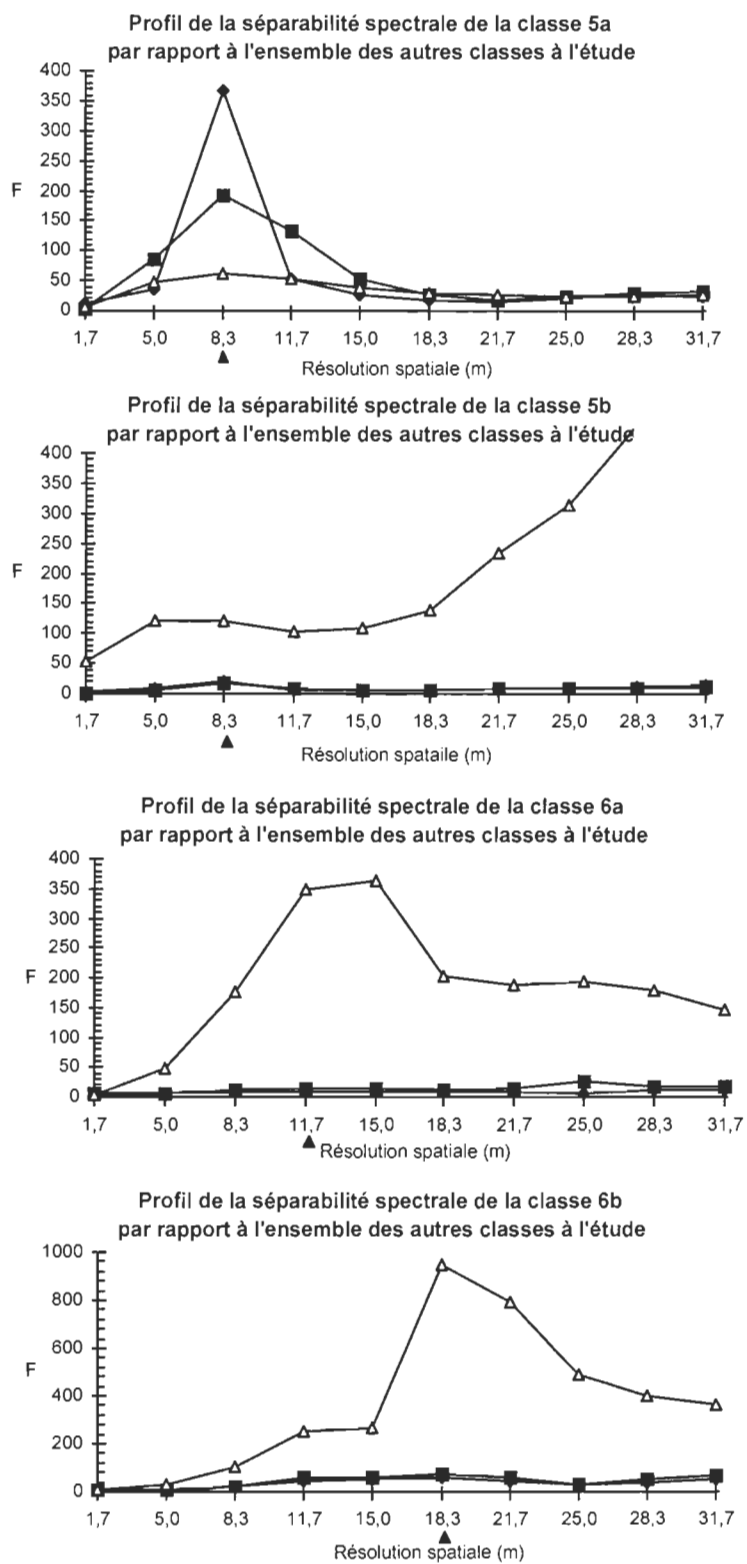


Figure 4.10 Profils de la séparabilité spectrale pour les classes 5a à 6b

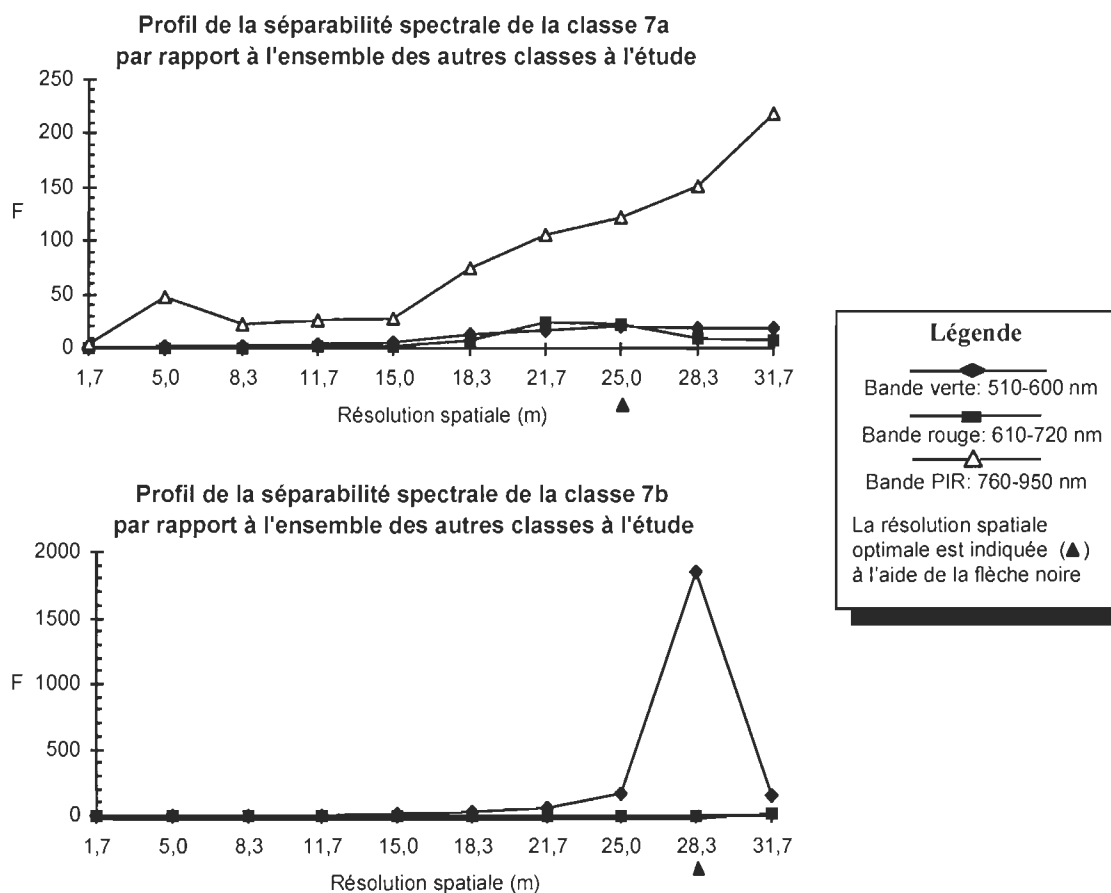


Figure 4.11 Profils de la séparabilité spectrale pour les classes 7a et 7b

Chapitre 5

CONCLUSION

CONCLUSION

Nous avons vu au cours de cette recherche que la forêt, en raison de ses divers rôles essentiels, nécessite des informations à caractère spatial. Malgré les méthodes de classification d'images de télédétection développées ces dernières années, les résultats nous démontrent que pour une classification donnée, le niveau d'erreur d'une classe à l'autre peut être considérablement élevé. En effet, à cause du niveau de détails requis, les capteurs satellitaires n'ont pas pu être en mesure de fournir les informations satisfaisantes pour mener à des méthodes opérationnelles en matière d'inventaire forestier et de cartographie des peuplements forestiers. Par ailleurs, en dépit des améliorations technologiques des capteurs de télédétection par la mise au point de résolutions spatiales, spectrales et radiométriques plus précises et du développement d'algorithmes de classification de plus en plus complexes, il apparaît évident, à la lumière des récentes recherches, que les classifications d'images numériques ne parviennent pas à donner des résultats satisfaisants sur une base régulière.

Comme nous l'avons illustré au cours de cette recherche, rien ne nous garantit que les unités spatiales arbitraires lors de l'acquisition sont appropriées pour discriminer les objets naturels composant la scène. De plus la définition des entités géographiques dépend implicitement de l'échelle de mesure et du niveau d'agrégation d'intérêt. En négligeant le choix de la résolution spatiale de l'image et du niveau d'agrégation approprié des objets, nous pouvons éprouver des difficultés pour déterminer une stratégie de classification efficace. Cependant, la définition d'un peuplement reposant uniquement sur le niveau d'agrégation spatiale et les paramètres forestiers peut s'avérer insuffisante pour expliquer entièrement les comportements spectral et spatial si l'on étudie ce dernier d'un point de vue télédétection. Nous avons donc intégré, au cours de

cette recherche, les paramètres tels que la pente et l'exposition dans la définition des entités géographiques afin d'observer les effets de la topographie.

Cette étude, réalisée sur un transect de la forêt des Monts de Lacaune (Tarn, France), avait pour objectif général d'appliquer l'approche de la méthode de la résolution spatiale optimale dans un environnement complexe soit un milieu forestier naturel montagneux. Les objectifs spécifiques, quant à eux, étaient 1) de procéder à l'identification de la résolution spatiale optimale pour chaque type de peuplement forestier, en terrain de faible inclinaison comme en terrain pentu, sur le transect des Monts de Lacaune (Tarn, France), 2) de vérifier l'utilité des paramètres topographiques (pente et exposition) dans la définition des entités géographiques d'intérêt et 3) d'identifier les canaux permettant la séparabilité spectrale maximale interclasse et la validité de la résolution spatiale optimale.

La méthode proposée au cours de cette recherche consistait à 1) définir les entités géographiques d'intérêt (objets étudiés) en incluant les facteurs topographiques (pente et exposition) dans leur définition 2) déterminer un critère d'optimisation, dans cette étude il s'agit de la variance spectrale minimale, 3) agréger spatialement les données acquises à très haute résolution 4) appliquer le critère d'optimisation aux données agrégées 5) valider les résultats obtenus à l'aide de l'analyse de la séparabilité spectrale à l'aide d'analyses de variance.

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode de la résolution spatiale optimale nous montre que la variance intra-classe à 1,67 m de résolution est relativement élevée pour l'ensemble des trois bandes spectrales (vert, rouge et PIR), elle diminue ensuite jusqu'à atteindre un minimum à des résolutions intermédiaires, puis remonte légèrement et se stabilise à des résolutions plus grossières. Cette tendance corrobore les résultats présentés dans l'étude de Marceau *et al.* (1994b). Pour l'ensemble des classes forestières

à l'étude, nous constatons que la résolution spatiale optimale pour les classes forestières de la zone d'étude varie de 8,3 à 28,3 m.. En ce qui concerne les paramètres forestiers, les résultats démontrent également que 1) la variance spectrale pour les diverses classes forestières à l'étude n'est pas nécessairement déterminée par l'essence prédominante. Cela vient appuyer le fait que ce sont plutôt les paramètres spatiaux et structuraux qui jouent un plus grand rôle dans la variabilité spectrale du peuplement; 2) l'organisation spatiale peut affecter grandement la résolution spatiale optimale pour les peuplements de feuillus; 3) les peuplements ayant subi des interventions sylvicoles présentent une augmentation de la résolution spatiale optimale. Ce phénomène d'accroissement de la variabilité spectrale de ce peuplement peut être lié à la diminution du taux de couvert et donc à l'augmentation de la part de sol nu. Cet accroissement requiert donc une taille de maille plus grande pour mieux intégrer toutes les variabilités inhérentes à cette entité géographique d'intérêt; 4) qu'il y a une légère variation de la résolution spatiale optimale entre les épicéas adultes couvrants par rapport aux jeunes couvrants. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les bandes de reboisement sont encore visibles dans le cas des jeunes, créant ainsi plus d'ombre portée et donc plus de variabilité spectrale au niveau de l'image. Les paramètres structuraux constituant le peuplement sont donc un facteur important pour expliquer le comportement spatial et spectral; 5) qu'il est très difficile de discriminer entre une futaie et un taillis pour un même peuplement forestier dans le cas des feuillus. En effet, en raison de la forte densité d'arbre, le couvert des essences de feuillus présentent des propriétés spectrales et spatiales similaires.

Par ailleurs, pour ce qui est des paramètres structuraux tels que la hauteur et le taux de couvert (densité), la zone d'étude ne pouvait pas nous offrir différents types de hauteur et de densité pour un même peuplement, nous permettant ainsi d'observer l'influence de ces paramètres sur la résolution spatiale optimale. Ces influences sont toutefois présentées dans l'étude de Marceau *et al.*, (1994b).

En examinant l'influence des paramètres topographiques sur les différents peuplements à l'étude nous observons une diminution sensible de la résolution spatiale optimale des peuplements se situant en terrain pentu (20-30%) par rapport à ceux se situant en terrain de faible inclinaison (0-10%). Deuxièmement, nous constatons que le peuplement peut présenter des changements au niveau spectral et spatial en fonction de l'exposition solaire du versant. Toutefois, le rôle de l'exposition solaire est moins prononcé lorsque les peuplements de feuillus et de conifères se situent en terrain de faible inclinaison. En ce qui concerne les peuplements caractérisés par un terrain plus pentu, nous constatons que l'influence de l'exposition entraîne des variations de la résolution spatiale optimale dans certains cas. Il apparaît donc que les paramètres topographiques doivent être pris en considération dans la définition des entités géographiques d'intérêt lorsque le peuplement se trouve en situation de topographie accidentée.

La séparabilité spectrale entre les différentes paires de classe nous montrent que la plupart de la confusion spectrale est relevée pour les classes en terrain de faible inclinaison ayant la même essence prédominante et les mêmes paramètres forestiers. Quand la pente est faible, les paramètres topographiques influencent peu la variabilité du peuplement. Ceux-ci sont donc négligeables dans la définition des entités géographiques d'intérêt se trouvant dans ces conditions. Par contre, en ce qui concerne les classes forestières se situant en topographie accidentée, les résultats confirment l'importance des paramètres topographiques tels que la pente et l'exposition solaire. En effet, ceux-ci démontrent non seulement une variation au niveau de la résolution spatiale optimale mais permettent également une excellente discrimination spectrale. De plus, l'examen des analyses de variance d'une classe donnée par rapport à l'ensemble des autres classes nous révèle que toutes les classes sont significativement différentes dans un contexte de classification, mais que la discrimination atteint toutefois un maximum de séparabilité à la résolution spatiale optimale ou très près. Les résultats démontrent

également que la bande spectrale du proche infrarouge favorise de façon plus importante la discrimination des peuplements forestiers par rapport aux bandes du vert et du rouge.

En conclusion, nos résultats indiquent que le concept de la résolution spatiale optimale démontre le lien qui existe entre la définition des entités géographiques d'intérêt et l'échelle de mesure. Cela confirme l'importance de choisir la résolution spatiale optimale ou une résolution contenue dans la plage de résolution où la variance intraclasse est très faible. Cette recherche a également montré que les graphiques représentant les courbes de variance en fonction de la résolution spatiale pour les différentes bandes spectrales nous donnent plusieurs informations statistiques pouvant mieux guider le choix des méthodes de classification d'image. Enfin, nous sommes en mesure d'affirmer qu'en présence de topographie accidentée, nous devons inclure de nouveaux paramètres topographiques dans la définition des peuplements afin de le considérer comme une autre entité géographique distincte. En améliorant ainsi la définition et en choisissant la résolution spatiale optimale, la classification des images numériques de télédétection devrait présenter un niveau d'exactitude accru.

Références

Références

- Ahern, F.J. and D.G. Leckie, 1987, Digital Remote Sensing for Forestry: Requirements and Capabilities, Today and Tomorrow, *Geocarto International*, (3), pp. 43-52
- Atkinson, P.M. and F.M. Danson, 1988, Spatial Resolution for Remote Sensing of Forest Plantations, Proceedings of IGARSS '88 Symposium, Edimburgh, Scotland, 13-16 Sept., 1988, pp. 221-223.
- Bonn, F., et G., Rochon, 1992, Précis de télédétection, Principes et Méthodes, Volume 1 UREF, Presses de l'Université du Québec, 485 pp.
- Campbell, J.B., 1987, Introduction to Remote Sensing, New York, Guilford Press, 551 pp.
- Cihlar, J.(ed.), 1986, « The use of LANDSAT data in forestry », *Remote Sensing Review*, 2, pp.1-258.
- CNES (Centre Spatial de Toulouse), 1994, Compte-Rendu d'opérations, Campagne aéroportée France-Portugal Mai-Juin 1994, Centre National d'Etude Spatial, Agence Française de l'Espace, (Document à diffusion réservée), Rédacteur: Hervé Cruchant, 152 pp.
- Conese, C., F., Marrachi, Miglietta, et ,F Masselli, 1988, Forest classification by principal component analyses of TM data, *Int. J. Remote Sensing*, 9 no.10 et 11: p.1597-1612
- Cushnie, J.L., 1987, The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies, *Int. J. Remote Sens.*,8(1) 5-29
- Duggin, M.J., and C.J. Robinove, 1990, Assumptions Implicit in Remote Sensing Data Acquisition and Analysis, *Int. J. of Remote Sensing*, 11, no. 10, pp. 1669-1694.
- Durrieu, S., et M., Deshayes, 1994, Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier. Application aux monts de Lacaune (Tarn, France), *Ann. Sci. For.*, 51: 147-161.

Durrieu, S., 1994, Utilisation de la télédétection satellitaire pour la mise à jour de la carte des types de peuplement de l'Inventaire Forestier National, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 202 pp., (Non publié).

Estes, J.E. and D.S. Simonett, 1975, Fundamentals of Image Interpretation. in *Manual of Remote Sensing*, R.G. Reeves, ed. Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 869-1076.

Everett, J. and D.S. Simonett, 1976, Principles, Concepts and Philosophical Problems in Remote Sensing, in *Remote Sensing of Environment*, J. Lintz and D.S. Simonett, eds Addison-Wesley, pp. 85-127.

Goel, N.S., 1989, Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data, Theory and Application of Optical Remote Sensing, Asrar, G., Wiley Series in Remote Sensing, pp. 205-248.

Gong, P. D.J. Marceau and P.J. Howarth, (1992), A comparison of Spatial Feature Extraction Algorithms for Land-Use Classification with SPOT HRV Data, *Rem. Sens. Environ.* 40: 137-151.

Grigg, D., 1967, Regions, Models and Classes. in *Integrated Models in Geography*, R.J. Chorley and P. Hagget eds., University Paperbacks, Mathuen Londo, pp. 461-509.

Harvey, D., 1969, Explanation in Geography, MacMillan of Canada, 521 pp.

Heller, R.C., et J.J. Ulliman, 1983, Forest Resources Assessment, In *Manual of Remote Sensing*, 2nd ed., R.N. Colwell ed..

Hilborn, W.H., 1978, Application of Remote Sensing in Forestry, dans *Introduction to Remote Sensing of Environment*, B.F. Richason, Jr., K.-H. Publishing Company, pp. 338-354.

Hudson, W.D., 1987, Evaluation of several classification schemes for mapping forest cover types in Michigan, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 8. no. 12, 1785-1796.

Inventaire Forestier National, 1992, La forêt à la carte, Ministère de l'agriculture et de la forêt, Direction de l'espace rural et de la forêt (France), 31 pp.

- Inventaire Forestier National**, 1990, Tarn -3^e cycle, Définition de types de formation, Échelon de Montpellier, IFN n° 528(90) FB/JN, 7 pp.
- Karaska, M.A., S.J., Walsh, et D.R. Butler**, 1986, Impact of environmental variables on spectral signatures acquired by the Landsat Thematic Mapper, *Int. J. Remote Sensing*, 7: pp. 1653-1667.
- Labbé, S.**, 1992, Intégration Télédétection et Systèmes d'Information Géographique: Algorithme de corrections d'image utilisant les modèles numériques de terrain, D.E.A. en Informatique, Université Montpellier II, *Sciences et Techniques du Languedoc*. (Non publié)
- Labovitz, M., D.L. Toll, and R.E Kennard**, 1980, Preliminary evidence for the influence of physiography and scale upon autocorrelation function of remotely sensed data, NASA TM 82064, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- Latty, R.S. and R.M. Hoffer**, 1980, Computer-based classification accuracy due to spatial resolution using per-point versus per-field classification techniques, *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, West Lafayette, IN.
- Leprieur, C.E., J.M. Durand and J.L. Peyron**, 1988, Influence of Topography on Forest Reflectance Using Landsat Thematic Mapper and Digital Terrain Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 491-496.
- Lieth, H.** 1975, Primary production of the major vegetation units of the world., *Ecol. Stud.*, 14: 203-215.
- Lindman, H.R.**, 1992, Analysis of Variance in Experimental Design, Springer-Verlag, 531 pp.
- Lintz, J. and D.S. Simonett**, 1976, Remote Sensing of Environment, Addison-Wesley ed. 694 pp.
- Lo, C.P.**, 1986 Applied Remote Sensing, Longman Scientific and Technical, England, 393 pp.

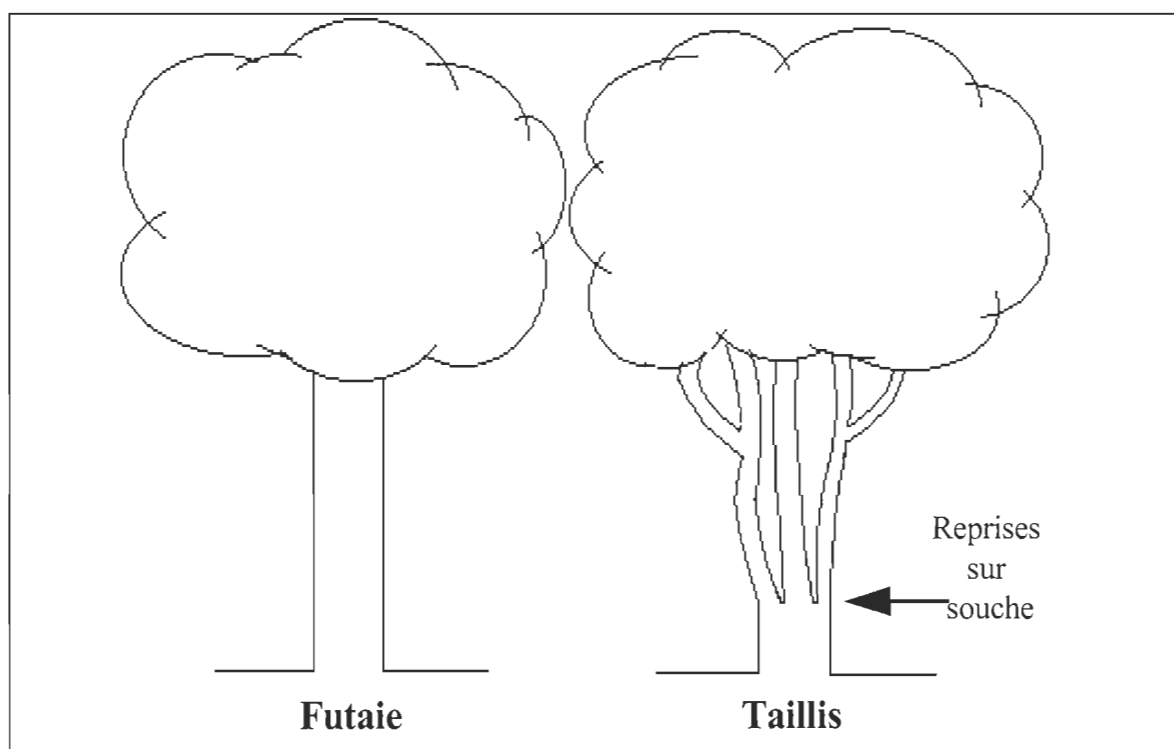
- Marceau, D.J.**, 1989, A Review of Image Classification Procedures with Special Emphasis on the Grey-Level Cooccurrence Matrix Method for Texture Analysis, *Earth- Observations Laboratory Report*, ISTS-EOL-TR89-007, 59 p.
- Marceau, D., D., Gratton, J.P., Fortin**, 1992, Interprétation Automatisée d'Images de Télédétection; Revue technologique des principales méthodes d'accentuation et de classification statistique appliquées à l'environnement forestier, INRS-Eau: Rapport scientifique no.354,PROGERT: DT1103, 82 pp
- Marceau, D.J.**, 1992, The problem of scale and spatial aggregation in remote sensing: an empirical investigation using forestry data, Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 180 pp., (Non publié).
- Marceau, D., D., Gratton, J.P., Fortin**, 1993, Développement d'une méthode pour identifier la résolution spatiale optimale pour la détection et la discrimination de couverts forestiers, INRS-Eau: Rapport scientifique no. R370,PROGERT: DT2207, 82 pp.
- Marceau, D.J., P.J., Howarth, and D.J., Gratton**, 1994a, Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 1. The Scale and the Spatial Aggregation Problem, *Remote Sens. Environ.*, 49: 93-104 .
- Marceau, D.J., D.J., Gratton, R.A., Fournier. and J.P., Fortin**, 1994b, Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 2. The Optimal Spatial Resolution, *Remote Sens. Environ.*, 49: 105-117.
- Markham, B.L., and J.R.G. Townshend**, 1981, Land cover accuracy as a function of sensor spatial resolution, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, pp 1075-1090.
- Morganstern, J.P., R.E. Nalepka, E.R. Kent. and J. Erikson**, 1976, Investigation of Landsat follow-on Thematic Mapper spatial radiometric and spectral resolution. ERIM Report No. 119300-F (Ann Arbor, Michigan: *Environmental Research Institute of Michigan*)
- O'Neill, N.T., J.R., Miller, and J.R., Freemantle**, 1995, Atmospheric correction, of airborne BRF to yield surface BRF: Nomenclature, Theory, and Methods, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21 (3), pp. 309-327

- Openshaw, S.**, 1984, The Modifiable Areal Unit Problem. *Concept and Techniques in Modern Geography*, (CATMOG), no. 38, 40 pp.
- Peterson, D.L. and S.W., Running**, 1989. Application in forest science and management, Theory and Application of Optical Remote Sensing, Wiley Series in Remote Sensing, Asrar, G., pp.429-465.
- Raffy, M.**, 1995, On the stability of area quantification's and nomenclatures with respect to sensor resolution, *EARSeF Advanced in Remote Sensing*, vol. 4, no. 3, pp.122-128.
- Sadowski, F.A., and J. Sarno**, 1976, Forest Classification Accuracy as Influenced by Multispectral Scanner Resolution, ERIM Report No. 109600-71F (Ann Arbor, Michigan: *Environmental Research Institute of Michigan*)
- Simonett, D.S. and J.C. Coiner**, 1971, Susceptibility of environments to low resolution imaging for land-use mapping, *Proc. of the 7th Int. Symp. On Remote Sensing of Environment* Ann Arbor, MI., pp. 373-394.
- Thomson, F.J., J. Erikson, R.E. Nalepka, and F. Weber**, 1974, Multispectral scanner data applications evaluation. Final Report Volume 1, ERIM Report No. 102800-40-I (Ann Arbor, Michigan: *Environmental Research Institute of Michigan*)
- Townshend, J.R.G.**, 1980, The spatial resolving power of earth resources satellites: a review, NASA Goddard Space Flight Center TM 82020, Greenbelt, MD.
- Townshend, J.R.G. and C.D., Justice**, 1988, Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations, *Int. J. Remote Sens.*, 9(2): 187-236
- Woodcock, C.E., and A.H., Strahler**, 1983, Characterizing Spatial Patterns in Remotely Sensed Data. *Proceedings of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, vol. 2, 9-12 May, Ann Arbor Michigan, pp. 839-852.
- Woodcock, C.E., and A.H., Strahler**, 1987, The factor of scale in remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 21:311-332

Annexes

Annexe 1

Les structures forestières



Annexe 2

Programme sur la résolution spatiale optimale **(Langage AML)**

grid

```
/* Programme sur la Resolution Spatiale Optimale
```

```
&type
```

```
&type | Programme sur la Resolution Spatiale Optimale |
```

```
&type |
```

```
/* Les variables utilisees sont:
```

```
/* a: La bande spectrale
```

```
/* b: La classe et le numero du point
```

```
/* c,d,e,f: Les limites de la maille
```

```
/* i: La distance du centre jusqu'a la limite de la maille
```

```
/* x: La coordonnee en x du point
```

```
/* y: La coordonnees en y du point
```

```
/* Espace
```

```
&type
```

```
/* Affichage de la question
```

```
&sv a = [response 'Entrez le nom de la bande']
```

```
/* Espace
```

```
&type
```

```
/* Demande le fichier a l'utilisateur
```

```
&sv fil = [response 'Entrez le nom du fichier des coordonnees a lire']
```

```
&if [null %fil%] &then
```

```
    &return &warning Aucun fichier entre.
```

```
&sv filunit = [open %fil% openstatus -read]
```

```
/* Verifie s'il y a erreur pour ouvrir le fichier
```

```
&if %openstatus% <> 0 &then
```

```
    &return &warning Erreur pour ouvrir le fichier.
```

```
/* Espace
```

```

&type

/* Extraction des coordonnes dans le fichier

&sv line = [read %filunit% readstatus]
&do &while %line% ne "

    &type Le point en traitement est: %line%

    &sv b = [extract 1, %line%]
    &sv x = [extract 2, %line%]
    &sv y = [extract 3, %line%]

/* Espace
&type

/* Affichage a l'ecran
&type Le calcul des moyennes est en cours...

/* Calcul de la moyenne

&sv moye = [show cellvalue %a% %x% %y%]

/* Copie la moyenne dans un fichier

&sv file = %b%%a%
&sv file_unit = [open %file% openstatus -append]

&sv record = [quote moyenne1: %moye%]
&sv writestat = [write %file_unit% %record%]
&sv closestat = [close %file_unit%]

/* Calcul de la moyenne

&sv i = 2.5

&do &until %i% > 15.85

    /* Creation des points de la maille
    &sv c = %x% - %i%
    &sv d = %y% - %i%
    &sv e = %x% + %i%
    &sv f = %y% + %i%

    setwindow %c% %d% %e% %f%
    setcell 1.667

```

```

/* Creation de la maille
mail = selectbox (%a%, %c%, %d%, %e%, %f%, inside)

q
tables

sel mail.sta
&sv moy2 = [show record 1 mean]

&sv files = %b%%a%
&sv fil-unit = [open %files% openstatus -append]

&sv records = [quote moyenne%i%: %moy2%]
&sv writestat = [write %fil-unit% %records%]
&sv closestat = [close %fil-unit%]

q
grid
kill mail

&sv i = %i% + 1.667

&end

&sv line = [read %filunit% readstat]

&end

&sv closestat = [close %filunit%]

&return

```

Annexe 3

Programme SPSS sur l'analyse de variance

```

TITLE      'A'
DATA LIST  FILE = "B" FIXED RECORDS = 1
              / BANDE 1 CLASSE 3-4 NIV_GRIS 6-11
SELECT IF  (CLASSE = X1 OR CLASSE = X2)      (Sélection des 2 classes désirées)

ANOVA      NIV_GRIS BY CLASSE (X1, X2)
              /STATISTICS

```

Programme SPSS sur l'analyse de variance multivariée

```

TITLE      'A'
DATA LIST  FILE = "B" FIXED RECORDS = 1
              / BANDE 1 CLASSE 3-4 NIV_GRIS 6-11
MANOVA     NIV_GRIS BY CLASSE (X1, X18)      (Sélection des 18 classes à l'étude)
              /PRINT = HOMOGENEITY

```

A: Titre du programme B: Nom du fichier de données X: Classe

(adapté de Lindman, 1992)