INRS

Développement d'une méthode pour identifier les résolutions spatiales optimales pour la détection et la discrimination de couverts forestiers PROGERT: DT2207 INRS-Eau: Rapport scientifique no. R370 Danielle Marceau, Denis Gratton et Jean-Pierre Fortin

> INRS-Eau 2800, rue Einstein, suite 105 Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

> > Janvier 1993

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Dr Don Leckie et Ed Cloney de l'Institut national de foresterie de Petawawa, en Ontario, de même que Richard Fournier, du Centre canadien de télédétection, pour leur support lors de l'acquisition des images MEIS-II et des données de terrain. Richard Fournier a de plus participé activement à plusieurs confrontations d'esprit très stimulantes sur le concept de résolution spatiale optimale. Nous remercions également Dr Bob Gauthier, du Centre canadien de télédétection, pour une fructueuse discussion au sujet de la FTM du MEIS-II. Nos meilleurs remerciements vont enfin à Dr Denis Gingras et John Laurent, de l'Institut national d'optique, pour leurs précieux conseils dans le domaine de la transformée de Fourier.

REMERCIEMENTSi
TABLE DES MATIÈRESii
LISTE DES TABLEAUXiii
LISTE DES FIGURESvii
1. INTRODUCTION
1.1 Objectifs du rapport6
1.2 Organisation du rapport7
2. SCHÉMA EXPÉRIMENTAL
2.1 Description du filtre spatial simulant la FTM d'un capteur à barrette
2.2 Description des données MEIS-II du 29 octobre 198520
2.3 Analyse de variance bivariée23
3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS
3.1 Interprétation des courbes de la variance spectrale en fonction de la
résolution spatiale et identification de la résolution spatiale optimale24
3.2 Séparabilité spectrale des classes forestières
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS
5. RÉFÉRENCES

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Caractéristiques des bandes spectrales MEIS-II du 29 août 1986 utilisées pour l'étude	3
Tableau 2 Classes forestières déterminées pour l'étude	5
Tableau 3 Classes de hauteur et de densité de tronc	;
Tableau 4 Caractéristiques des bandes spectrales MEIS-II du 29 octobre 1985 utilisées pour l'étude	L
Tableau 5a Corrélation entre les bandes spectrales du survol d'automne (29 octobre 1985)	2
Tableau 5b Corrélation entre les bandes spectrales du survol d'été (29 août 1986)	2
Tableau 6 Résolutions spatiales optimales identifiées pour chaque classe forestière selon les trois conditions d'acquisition de données 27	,
Tableau 7 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 1	5
Tableau 8 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 2	6
Tableau 9 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 3	ļ
Tableau 10 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 4	ŀ
Tableau 11 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 5	5
Tableau 12 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 6	5
Tableau 13 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 7	Ś
Tableau 14 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 8	5
Tableau 15 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 9	,

Tableau 16 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 1057
Tableau 17 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 11
Tableau 18 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 1358
Tableau 19 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 1459
Tableau 20 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 15
Tableau 21 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 2060
Tableau 22 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 2160
Tableau 23 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 161
Tableau 24 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 261
Tableau 25 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 3
Tableau 26 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 4
Tableau 27 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 5
Tableau 28 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 6
Tableau 29 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 7

v

Tableau 30 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 864
Tableau 31 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 9
Tableau 32 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 10
Tableau 33 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 11
Tableau 34 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 13
Tableau 35 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué auximages d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrettepour la classe forestière 14
Tableau 36 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 15
Tableau 37 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 20
Tableau 38 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 4
Tableau 39 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 5
Tableau 40 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 6
Tableau 41 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 7

Tableau 42 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 8	71
Tableau 43 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 9	71
Tableau 44 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 10	72
Tableau 45 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 11	72
Tableau 46 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 13	73
Tableau 47 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 14	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Relation entre la taille d'un objet géographique, la dimension du pixel et la structure d'une image de télédétection	2
Figure 2 Localisation du site d'étude	2
Figure 3 Étendue spectrale des bandes MEIS-II du 29 août 1986 illustrées sur la courbe de réflectance standard de la végétation	3
Figure 4 Représentation de la FTM idéale d'un capteur	9
Figure 5a Fonctions théoriques de transfert de modulation, parallèle à la barrette de détecteurs, calculées selon l'équation 1 pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986	12
Figure 5b Fonctions théoriques de transfert de modulation, orthogonale à la barrette de détecteurs, calculées selon l'équation 1 pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986	12
Figure 6a Fonctions d'amplitude normalisées, parallèle à la barrette de détecteurs, pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986	15
Figure 6b Fonctions d'amplitude normalisées, orthogonale à la barrette de détecteurs, pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986	15
Figure 7a Fonctions théoriques de transfert de modulation, parallèle et orthogonale à la barrette de détecteurs ainsi que de l'ensemble du système, calculées selon les équations 1 et 2	16
Figure 7b Fonctions d'amplitude normalisées, parallèle et orthogonale à la barrette de détecteurs ainsi que de l'ensemble du système	17
Figure 8 Représentation schématique du filtre requis pour dégrader la résolution spatiale de 50 cm à 150 cm à partir des sept coefficients d'amplitude correspondants	19
Figure 9 Étendue spectrale des bandes MEIS-II du 29 octobre 1985 illustrées sur la courbe de réflectance standard de la végétation	21
Figure 10 Légendes utilisées pour représenter les bandes spectrales dans les figures 11 à 31 et fonction des principales bandes spectrales	28
Figure 11 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 les trois conditions d'acquisition de données	29

Figure 12 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 les trois conditions d'acquisition de données	30
Figure 13 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 les trois conditions d'acquisition de données	31
Figure 14 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 les trois conditions d'acquisition de données	32
Figure 15 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 les trois conditions d'acquisition de données	33
Figure 16 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 les trois conditions d'acquisition de données	34
Figure 17 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 les trois conditions d'acquisition de données	35
Figure 18 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 8 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	36
Figure 19 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 9 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	37
Figure 20 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 10 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	
Figure 21 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 11 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	39

1

ix

Figure 22 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 12 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	40
Figure 23 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 13 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	41
Figure 24 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 14 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	42
Figure 25 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 15 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	43
Figure 26 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 16 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	44
Figure 27 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 17 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	45
Figure 28 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 18 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	46
Figure 29 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 19 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	47
Figure 30 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 20 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	48
Figure 31 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 21 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données	49

х

Figure 32 Profil de la séparabilité spectrale des images d'été, dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette, en fonction de la résolution spatiale pour les classes forestières 14 et 20	75
Figure 33 Profil de la séparabilité spectrale des images d'été, dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette, en fonction de la résolution spatiale pour les classes forestières 4 et 5	75

1. INTRODUCTION

Le présent rapport fait suite au rapport d'étape (Marceau *et al.*, 1992) concernant le développement d'une méthode pour identifier les résolutions spatiales optimales à la détection de couverts forestiers à partir de données de télédétection. Cette méthode repose sur le cadre conceptuel suivant (Marceau, 1992). 1

L'acquisition d'une image de télédétection correspond en fait à l'application d'une grille d'échantillonnage, de forme et de dimension fixes définies par la résolution spatiale du capteur, au-dessus d'une région géographique donnée. Lorsque la résolution spatiale est plus petite que la taille de l'objet d'intérêt, l'information contenue dans le pixel correspond à diverses composantes de cet objet. La probabilité que plusieurs pixels représentatifs de l'objet aient des valeurs de gris différentes est forte, ce qui se traduit par une structure hétérogène de l'image et une variance spectrale interne élevée (Fig. 1). Similairement, lorsque la dimension du pixel est très grande par rapport à la taille de l'objet d'intérêt, l'information contenue dans le pixel correspond à l'agrégation d'éléments au sol qui n'ont plus de correspondance avec l'objet d'intérêt, ce qui peut aussi engendrer une structure hétérogène de l'image et une variance spectrale élevée.

Lors du passage d'un extrême à l'autre, il existe une situation d'équilibre qui apparaît lorsque la taille du pixel correspond au niveau d'agrégation spatiale caractéristique de l'objet au sol, ce qui se traduit alors par une structure plus homogène de l'image et, en terme spectral, par une faible variance interne de la classe ainsi formée. Cette baisse de la variance représente la résolution spatiale optimale appropriée à l'objet géographique d'intérêt qui tient compte à la fois des propriétés spectrales et spatiales qui lui sont propres.

Un tel projet de recherche présente un intérêt à plusieurs niveaux. D'abord, il offre la possibilité de déterminer, de manière autre qu'intuitive, la gamme de résolutions spatiales à l'intérieur de laquelle devrait opérer un capteur conçu pour l'étude du milieu forestier. Ensuite, il permet d'associer le contenu en information d'images de télédétection avec des propriétés spatiales intrinsèques des couverts forestiers souvent négligées lors des processus d'acquisition et d'interprétation de ces images.



Figure 1 Relation entre la taille d'un objet géographique, la dimension du pixel et la structure d'une image de télédétection.

Les données utilisées proviennent du capteur aéroporté MEIS-II et représentent une portion de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, centrée approximativement à 46°01'N / 77°25'O (Fig. 2).



Figure 2 Localisation du site d'étude.

Elles ont été acquises le 29 août 1986, vers 10:00 heure locale, à 50 cm de résolution spatiale dans huit bandes spectrales s'étendant du bleu au proche-IR (Fig. 3; Tabl. 1).



Figure 3 Étendue spectrale des bandes MEIS-II du 29 août 1986 illustrées sur la courbe de réflectance standard de la végétation.

Numéro de la bande	Longueur d'onde centrale (nm)	Limite inférieure (nm)	Limite supérieure (nm)	Étendue spectrale (nm)
4	480	464	495	31
8	548	532	564	32
2	675	655	694	39
7	698	691	704	13
6	710	702	718	16
5	734	725	742	17
3	746	737	754	17
1	776	757	794	37

Tableau 1 Caractéristiques des bandes spectrales MEIS-II du 29 août 1986 utilisées pour l'étude.

Des sites représentatifs de 21 classes forestières, caractérisées par l'espèce, la hauteur, la densité et l'organisation des peuplements, ont été sélectionnés sur l'image (Tabl. 2 et 3). Il est à noter que, lors de la première étape de l'étude (Marceau *et al.*, 1992), certaines classes étaient représentées par sept ou huit sites. Ce nombre a été réduit à six afin de permettre une comparaison plus juste entre ces classes. À partir du centre de chacun des sites, la résolution spatiale des données a été dégradée jusqu'à 30 m, selon un incrément d'un mètre, à l'aide d'un algorithme basé sur la moyenne arithmétique simulant une fonction idéale de transfert de modulation du capteur. La variance spectrale interne de chaque classe a ensuite été calculée, dans les huit bandes spectrales, pour chacune des résolutions spatiales.

L'analyse des résultats a permis de faire ressortir les constatations suivantes (Marceau *et al.*, 1992):

1) Pour chacune des classes forestières considérées, il existe une résolution spatiale qui minimise la variance intra-classe et ce, pour l'ensemble des bande spectrales utilisées lors de l'étude. Cette résolution optimale se situe, pour la majorité des classes, entre 5 m et 20 m et intègre dans des proportions variables des couronnes d'arbres, de l'ombrage et du sous-bois.

2) Parmi les variables utilisées pour distinguer les classes forestières, l'espèce joue un rôle secondaire; ce sont les caractéristiques spatiales (hauteur, densité et organisation des peuplements) qui déterminent le plus la résolution spatiale optimale.

3) Dans le cas des peuplements naturels, la résolution spatiale optimale tend à être plus grossière au fur et à mesure que la densité du peuplement diminue. Cette relation s'explique par le fait qu'à une densité faible, un pixel doit correspondre à une plus grande surface sur le terrain avant d'intégrer la proportion appropriée de couronne, d'ombrage et de sous-bois qui minimise la variance spectrale de la classe.

4) Dans le cas des plantations, c'est la hauteur des arbres qui joue un rôle prépondérant, la résolution spatiale optimale s'avérant plus fine lorsque la hauteur des arbres est faible. En effet, la croissance des arbres se trouve perturbée lorsque leur espacement est restreint, ce qui se traduit par une variance spectrale élevée jusqu'à des résolutions assez grossières.

Classes forestières	# de sites	Hauteur*	Densité*	Organisation
1: Peupliers	6	1	5	Naturel
faux-trembles				
2: Peupliers	6	2	3	Naturel
faux-trembles				
3: Peupliers	6	2	2	Naturel
faux-trembles				
4: Pins gris	6	1	4	Plantation
5: Pins gris	6	2	4	Plantation
6: Pins gris	6	1	3	Plantation
7: Pins gris	6	2	3	Plantation
8: Pins gris	6	2	2	Plantation
9: Pins gris	6	1	1	Plantation
10: Pins gris	6	2	3	Naturel
11: Pins gris	6	2	2	Naturel
12: Pins gris	3	2	1	Naturel
13: Pins rouges	6	2	2	Plantation
14: Pins rouges	6	3	2	Naturel
15: Pins rouges	6	3	1	Naturel
16: Pins sylvestres	3	1	1	Plantation
17: Pins sylvestres	3	2	1	Plantation
18: Pins sylvestres	3	2	1(<5%)	Plantation
19: Mélèzes	2	2	3	Plantation
20: Pins et peupliers faux-trembles (forêt	6	4	2	Naturel
mixte) 21: Peupliers faux-trembles et pins (forêt mixte)	6	4	2	Naturel

Tableau 2 Classes forestières déterminées pour l'étude.

* selon les classes établies au tableau 3

Tableau	3	Classes	de	hauteur	et de	e do	ensité	de	tronc.
---------	---	---------	----	---------	-------	------	--------	----	--------

Classes de hauteur (m)	Classes de densité de tronc (%)
	1: 0 - 25
1: 0 - 5	2: 26 - 50
2: 6 - 10	3: 51 - 75
3: 11 - 15	4: 76 - 100
4: 16 - 20	5: >100

À la suite de ces résultats, il est apparu important d'entreprendre des études de sensibilité afin de vérifier la solidité du concept de résolution spatiale optimale pour la détection de couverts forestiers dans diverses conditions d'acquisition de données. Parmi les principaux facteurs pouvant affecter la qualité des images et leur contenu en information, deux ont été retenus. Le premier est la fonction de transfert de modulation (FTM) du capteur qui, de façon générale, exprime la capacité d'un système d'acquisition à reproduire fidèlement une scène. Le second facteur est le temps d'acquisition des données auquel se trouvent étroitement associées les conditions phénologiques de la scène et, par conséquent, l'information spectrale des images.

Dans l'ensemble de l'étude, les trois conditions d'acquisition de données suivantes ont donc été considérées: 1) filtre moyen simulant une FTM idéale du capteur appliqué sur des images d'été, 2) filtre généré à partir de la FTM théorique d'un capteur à barrette appliqué sur des images d'été et 3) filtre généré à partir de la FTM théorique d'un capteur à barrette appliqué sur des images d'été et 3) filtre généré à partir de la FTM théorique d'un capteur à barrette appliqué sur des images d'automne.

Dans le domaine forestier, l'objectif ultime de l'acquisition de données de télédétection consiste souvent à extraire des images de l'information utile pour l'inventaire et la gestion des ressources. Il est donc aussi apparu important de tester la validité du concept de résolution spatiale optimale pour la discrimination des couverts forestiers en mesurant la séparabilité spectrale de chaque classe, à la résolution spatiale définie comme optimale dans les trois conditions d'acquisition de données précédemment définies.

1.1 Objectifs du rapport

Les principaux objectifs du rapport sont les suivants:

1) Identifier les résolutions spatiales optimales pour la **détection** de couverts forestiers dans les conditions d'acquisition de données précédemment décrites, c'est-à-dire en tenant compte de la fonction de modulation de transfert du capteur et du temps d'acquisition;

2) Vérifier l'importance de la résolution spatiale optimale pour la **discrimination** de couverts forestiers dans les trois conditions d'acquisition de données précédemment définies;

3) Contribuer à l'élaboration d'une théorie spatiale essentielle au développement de nouvelles méthodes d'acquisition et d'analyse d'images de télédétection intégrant des propriétés spectrales et spatiales des objets géographiques à l'étude.

1.2 Organisation du rapport

Le schéma expérimental de l'étude est présenté à la deuxième section. Les étapes nécessaires à la construction du filtre spatial généré à partir de la FTM théorique d'un capteur à barrette sont d'abord explicitées. À la section 2.2, les données MEIS-II d'automne, acquises le 29 octobre 1985, sont décrites. L'analyse de variance bivariée effectuée afin de mesurer la séparabilité spectrale des classes forestières est présentée à la section 2.3.

Les résultats obtenus sont présentés à la section 3. L'interprétation des courbes de variance spectrale en fonction de la résolution spatiale et l'identification de la résolution spatiale optimale, pour les trois conditions d'acquisition de données, sont d'abord fournies. Les résultats des tests de variance bivariée sont ensuite présentés, suivis par une interprétation des courbes de séparabilité spectrale en fonction de la résolution spatiale. Des conclusions et recommandations, de même qu'une liste de références, complètent le rapport.

2. SCHÉMA EXPÉRIMENTAL

Le schéma expérimental présenté dans ce rapport fait suite à la première partie de l'étude dans laquelle la résolution spatiale optimale des classes forestières a été déterminée sur des images d'été (29 août 1986) dont la résolution spatiale a été dégradée à l'aide d'un filtre moyen simulant une fonction idéale de transfert de modulation du capteur (Marceau *et al.*, 1992).

La deuxième partie de l'étude comporte trois principales étapes. La première est la création du filtre spatial généré à partir des fonctions théoriques de modulation de transfert d'un capteur à barrette (Zwick *et al.*, 1978) et appliqué sur les images MEIS-II d'été lors du processus de dégradation de la résolution spatiale. La seconde étape consiste à appliquer cette méthodologie sur des images MEIS-II d'automne, acquises le 29 octobre 1985 au-dessus du même secteur, afin d'évaluer l'impact du temps d'acquisition sur la résolution spatiale optimale. La troisième étape consiste à effectuer des analyses de variance bivariées pour mesurer la séparabilité spectrale de chaque classe forestière, à la résolution spatiale optimale établie au préalable pour les différentes conditions d'acquisition de données.

2.1 Description du filtre spatial simulant la FTM d'un capteur à barrette

La réponse en fréquence spatiale d'un capteur multispectral à barrette est généralement définie par sa fonction de transfert de modulation qui représente l'énergie enregistrée par le système en fonction de la fréquence spatiale. L'équivalent de la FTM dans le domaine spatial est une fonction d'amplitude (connue en anglais sous le nom de Point Spread Function) formée par des poids relatifs attribués aux pixels correspondant à chaque point d'une scène compris à l'intérieur du champ de vision instantanée du capteur. La FTM idéale d'un capteur, définie en cycle par pixel, est unitaire jusqu'à la fréquence de Nyquist et nulle à partir de ce seuil (Fig. 4). Une telle relation indique qu'il n'existe aucun recoupement de l'énergie enregistrée par le capteur, exprimée en valeurs de gris par pixel, correspondant à différents points de la scène. Elle peut être représentée par une simple variation de l'ouverture de la lentille et modélisée par un calcul de la moyenne arithmétique des valeurs de gris (Marceau *et al.*, 1992).



Figure 4 Représentation de la FTM idéale d'un capteur.

Afin de simuler des conditions réelles d'acquisition, la modélisation de la FTM d'un capteur à barrette doit intégrer les trois composantes physiques du système d'acquisition qui influencent le plus la réponse spatiale au capteur, soient la lentille, la barrette de détecteurs et le système électronique d'échantillonnage (Zwick *et al.*, 1978) (Équations 1 à 11).

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{p}} = \mathbf{FTM}_{\mathbf{L}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{G}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{D}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{E}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{DA}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{I}}$$
(1)

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{O}} = \mathbf{FTM}_{\mathbf{L}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{G}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{S}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{E}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{DA}} \times \mathbf{FTM}_{\mathbf{I}}$$
(2)

où:

FTM $_{P}$ = la FTM parallèle à la barrette de détecteurs,

FTM o = la FTM orthogonale à la barrette de détecteurs,

FTM $_{L}$ = la FTM de la lentille,

FTM $_{G = la}$ FTM de la géométrie des diodes de la barrette de détecteurs,

FTM p = la FTM liée à la diffusion des charges pour un détecteur,

 $FTM_s = la FTM de l'échantillonnage lors de l'acquisition orthogonale à la barrette,$

FTM E = la FTM du filtre électronique de seuillage de bande,

FTM DA = la FTM de la conversion du mode analogique au mode numérique,

FTM I = la FTM du système de production de l'image.

10

FTM _L =
$$\frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \mathbf{y} - \mathbf{y} (1 - \mathbf{y}^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$
 (3)

où:

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}_{\mathbf{n}\mathbf{o}} \,\lambda \mathbf{F} \tag{4}$$

où:

 $\mathbf{f}_{\mathbf{n}0}$ = ouverture de la lentille, idéalement supérieure à 2,8,

 $\lambda = la longueur d'onde (en mm),$

 \mathbf{F} = la fréquence spatiale (cycle/pixel).

Pour la modélisation de la FTM de la lentille, l'ouverture utilisée est 5,6.

La FTM de la géométrie des diodes, FTM_{G} , varie selon qu'il s'agit de la FTM_{P} ou de la FTM_{O} . Dans le cas de la FTM parallèle à la barrette de détecteurs:

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{G}} = \frac{\sin\left(\pi \mathbf{F}\mathbf{p}/2\right)}{\left(\pi \mathbf{F}\mathbf{p}/2\right)} \frac{\sin\left(\pi \mathbf{F}\mathbf{p}\right)}{\left(\pi \mathbf{F}\right)}$$
(5)

où:

 $\mathbf{p} = 1$ 'espacement entre deux diodes (approximativement équivalent à un pixel). La même géométrie de détecteurs que Zwick *et al.* (1978) a été utilisée, c'est-à-dire une barrette de photodiodes Reticon en forme de trapèze où la largeur du pic principal de réponse est égale à $\mathbf{p}/2$.

Dans le cas de la FTM orthogonale à la barrette de détecteurs, la réponse spatiale est plus symétrique et la FTM _G devient alors:

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{G}} = \frac{\sin\left(\pi \mathbf{F}\mathbf{p}\right)}{(\pi \mathbf{F})} \tag{6}$$

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{D}} = \frac{1 - \frac{\exp(-\alpha \mathbf{d})}{1 + \alpha \mathbf{L}}}{1 - \frac{\exp(-\alpha \mathbf{d})}{1 + \alpha \mathbf{L}_{0}}}$$
(7)

où:

 α = le coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde (Palik, 1991),

 $\begin{array}{l} \mathbf{d} &= 5 \ \mu \mathbf{m} \\ \mathbf{L}_{0} &= 50 \ \mu \mathbf{m} \end{array}$

()

$$\mathbf{L} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{L_0^2} + (2\pi \mathbf{F})^2}}$$
(8)

Il est à noter que, malgré une influence appréciable de la $\mathbf{FTM}_{\mathbf{D}}$ sur la forme de la FTM totale, sa contribution sur la réponse spatiale ne devient vraiment significative qu'à des longueurs d'onde supérieures à 800 nm.

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{S}} = \frac{\sin\left(\pi \mathbf{F} \mathbf{P}\right)}{(\pi \mathbf{F} \mathbf{P})} \tag{9}$$

où:

 $\mathbf{P} = \mathbf{p}$ que l'on suppose correspondre à la largeur du pixel.

La FTM du filtre électronique, FTM_E , varie selon qu'il s'agit de la FTM_P ou de la FTM O. Dans le cas de la FTM parallèle à la barrette de détecteurs:

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{E}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\mathbf{F}/\mathbf{F}_0)^8}}$$
(10)

où:

 $\mathbf{F}_0 =$ la fréquence de Nyquist.

Dans le cas de la FTM orthogonale à la barrette de détecteurs, la FTM_E est considérée comme étant égale à 1.

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{DA}} = \frac{\sin\left(\pi \mathbf{F}\mathbf{p}\right)}{(\pi \mathbf{F}\mathbf{p})} \tag{11}$$

Dans le domaine spatial, la \mathbf{FTM}_{I} est approximativement gaussienne et est généralement assez faible; on suppose qu'elle est essentiellement égale à 1 dans les deux directions.

La première étape de création du filtre spatial consiste à générer la FTM pour chacune des bandes spectrales dans deux orientations, soit parallèle et orthogonale à la barrette de détecteurs, à partir des équations 1 et 2 (Fig. 5a et 5b).



Figure 5a Fonctions théoriques de transfert de modulation, parallèle à la barrette de détecteurs, calculées selon l'équation 1 pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986.



Figure 5b Fonctions théoriques de transfert de modulation, orthogonale à la barrette de détecteurs, calculées selon l'équation 1 pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986.

L'observation de ces courbes révèle que la longueur d'onde a une influence sur le profil de la FTM_p alors que son effet est négligeable sur le profil de la FTM_0 . Ce

phénomène s'explique par les variations du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde associées à la diffusion des charges du détecteur (**FTMd**) qui interviennent lors du calcul de la **FTMp**.

La seconde étape consiste à représenter chaque FTM dans le domaine spatial, c'est-à-dire en distance par unité de pixel, de façon à générer des fonctions d'amplitude qui serviront à bâtir le filtre requis pour la séquence de dégradation de la résolution spatiale. Cette opération est réalisée en effectuant une transformée inverse de Fourier de chaque FTM. L'algorithme utilisé est la transformée de Fourier rapide (TFR) (Press *et al.*, 1986).

Pour une FTM représentée par $H_{(F)}$ avec une variable réelle F en cycle/pixel, la transformée inverse de Fourier $h_{(P)}$ est donnée par:

$$h_{(P)} = \int_{-\infty}^{\infty} H_{(F)} \exp^{-j\pi FP} d(F)$$
(12)

où: $j = \sqrt{-1}$

Étant donné que la FTM dans le domaine des fréquences spatiales (ou de Fourier) doit être complexe et que les valeurs obtenues pour la variable F sont réelles, le calcul de la transformée inverse de Fourier s'effectue en supposant la partie imaginaire de chaque valeur complexe égale à 0. Cette façon de procéder satisfait la symétrie nécessaire imposée par la transformée de Fourier entre le domaine des fréquences spatiales et le domaine des distances sur l'image. De cette façon, la fonction résultante $h_{(P)}$ est complexe et peut être représentée par:

$$h_{(P)} = R_{(P)} + jI_{(P)}$$
(13)

ou bien par:

$$h_{(P)} = |h_{(P)}| \exp^{j\phi_{(P)}}$$
(14)

où l'amplitude $|h_{(P)}|$ et la phase $\phi_{(P)}$ sont toutes deux composées d'une partie réelle $R_{(P)}$ et d'une partie imaginaire $I_{(P)}$:

$$\left| \mathbf{h}_{(\mathbf{P})} \right| = \left[\mathbf{R}^{2}_{(\mathbf{P})} + \mathbf{I}^{2}_{(\mathbf{P})} \right]^{1/2}$$
(15)

$$\phi_{(P)} = \arctan\left[\frac{I_{(P)}}{R_{(P)}}\right]$$
(16)

Toutefois, étant donné que la partie imaginaire a été établie égale à 0 pour les fins de la transformée inverse, l'amplitude est obtenue par:

$$\left|\mathbf{h}_{(\mathbf{P})}\right| = \left[\mathbf{R}^{2}_{(\mathbf{P})}\right]^{1/2} \tag{17}$$

La phase est alors considérée comme nulle.

Le passage du domaine des fréquences spatiales au domaine spatial se fait à partir d'un ensemble de points échantillonnés à des intervalles réguliers sur la FTM. L'échantillonnage de la FTM est effectué à des intervalles ΔF égaux à:

$$\Delta F = \frac{1}{N\Delta P}$$
(18)

où:

N = la longueur de la série de Fourier,

 $\Delta P = l'$ intervalle dans le domaine spatial.

Afin d'assurer une représentation adéquate du profil de chaque FTM, 32 points ont été sélectionnés entre 0 et 1 cycle/pixel sur chacune des courbes correspondant aux huit bandes spectrales. En conséquence, $\Delta F = 1/32$. Ce chiffre tient compte de la limitation de 2ⁿ points imposée par l'algorithme de la TFR.

L'échantillonnage de la FTM nécessite l'utilisation de la transformée discrète inverse de Fourier qui s'écrit:

$$h_{(P)} = \frac{1}{N} \sum_{F=0}^{N-1} H_{(F)} \exp^{-[j2\pi FP/N]}$$
(19)

pour F = 0, 1, 2, ..., N-1.

Le nombre de valeurs d'amplitude résultant de la transformée inverse est déterminé par le rapport entre la longueur de la série de Fourier et le nombre de points échantillonnés sur le profil de la FTM. La dégradation de la résolution spatiale devant être réalisée de 50 cm à 32,5 m, le nombre maximal de coefficients requis par pixel (ΔP) pour la création des filtres spatiaux est donc fixé à 64 ($\Delta P=1/64$) (dû à la limitation de 2ⁿ de la TFR). Alors si $\Delta F=1/32$ et le plus petit $\Delta P=1/64$, en résolvant l'équation 18, on obtient N=2048. Cette série de Fourier est créée en complétant la série initiale de 32 valeurs sélectionnées sur la FTM par des zéros jusqu'à l'obtention de 2048 données. Il s'agit d'une procédure d'interpolation standard lors de l'utilisation de la TFR.

L'examen des fonctions d'amplitude obtenues pour chaque bande spectrale révèle que la portion significative des courbes est représentée par les 192 premières valeurs réparties de part et d'autre du centre, correspondant à une distance sur l'image définie par -1,5 à 1,5 pixel (Fig. 6a et 6b).



Figure 6a Fonctions d'amplitude normalisées, parallèle à la barrette de détecteurs, pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986.



Figure 6b Fonctions d'amplitude normalisées, orthogonale à la barrette de détecteurs, pour les huit bandes MEIS-II du 29 août 1986.

Une comparaison des valeurs d'amplitude obtenues par bande spectrale révèle que, dans le cas de l'orientation parallèle à la barrette de détecteurs, la différence maximale est d'environ 2% alors qu'elle n'atteint que 0,1% dans le cas de l'orientation orthogonale à la barrette. Afin de minimiser les calculs requis pour la création des filtres de ré-échantillonnage spatial, la FTM moyenne des huit bandes spectrales a été déterminée dans les deux orientations et une nouvelle courbe d'amplitude a été calculée. Ces deux courbes résultantes s'avérant à leur tour très semblables (leur différence étant inférieure à 1%), une TFR a été appliquée sur la moyenne de la FTM des deux orientations afin de générer la courbe finale représentative du système d'acquisition (Fig. 7a et 7b).

L'interprétation de ces courbes révèle que l'information contenue à l'intérieur d'un pixel de l'image est constituée à 67% de l'énergie provenant de la surface au sol correspondant à ce pixel et de 33% de l'énergie provenant des surfaces avoisinantes sur une distance équivalant à un pixel.



Figure 7a Fonctions théoriques de transfert de modulation, parallèle et orthogonale à la barrette de détecteurs ainsi que de l'ensemble du système, calculées selon les équations 1 et 2.



Figure 7b Fonctions d'amplitude normalisées, parallèle et orthogonale à la barrette de détecteurs ainsi que de l'ensemble du système.

Chaque filtre spatial servant à dégrader la résolution spatiale, de 50 cm à 32,5 m, est finalement créé en échantillonnant le nombre de coefficients requis sur la fonction d'amplitude du système. La première étape consiste à déterminer l'intervalle d'échantillonnage de la fonction d'amplitude pour générer chacune des résolutions spatiales désirées (Équation 20).

$$\Delta P_{\rm F} = \frac{1}{\left(\frac{R_{\rm F}}{R_{\rm I}}\right) - 1} \tag{20}$$

où: ΔP_F = intervalle d'échantillonnage de la fonction d'amplitude, R_F = résolution spatiale finale, R_I = résolution spatiale initiale.

La seconde étape consiste à identifier la position des valeurs obtenues sur la série de Fourier calculée à des intervalles ΔP_o (193 valeurs) correspondant à l'intervalle d'échantillonnage ΔP_F (Équation 21). Ce calcul est effectué de part et d'autre du zéro de la fonction d'amplitude.

$$X_{1} = \frac{\Delta P_{F}}{\Delta P_{o}} + X_{0}, X_{2} = \frac{\Delta P_{F}}{\Delta P_{o}} + X_{1}, \dots, X_{N} = 96$$
(21)

17

où: X_N = position du coefficient de la fonction d'amplitude, X_0 = 0, ΔP_0 = 1/64.

La troisième étape consiste à identifier la valeur de chaque coefficient sur la fonction d'amplitude à la position X_N (Équation 22).

$$C_{P} = \left| R_{(X_{N})} \Delta F \Delta P_{F} \right|$$
(22)

où:

 C_{P} = coefficient d'amplitude à chaque intervalle ΔP_{F} ,

 $R(X_N)$ = partie réelle de la série de Fourier, dans le domaine spatial, à la position X_N , ΔF = intervalle d'échantillonnage de la FTM (1/32).

Dans le cas où X_N n'est pas une valeur entière, une interpolation linéaire est effectuée entre les valeurs précédant et suivant X_N sur la série de Fourier.

Finalement, chaque coefficient C_p est divisé par la somme des coefficients d'amplitude afin de produire un filtre unitaire. Pour obtenir ce filtre en deux dimensions, il est ensuite multiplié par lui-même puis appliqué au centre de chaque site de l'image pour le ré-échantillonnage spatial (Fig. 8).

À cause de la dimension du filtre simulant la FTM, certains sites représentatifs des classes forestières n'ont pu être ré-échantillonnés à toutes les résolutions spatiales désirées parce que situés en bordure de l'image. Dans certains cas, des sites ont été éliminés du calcul de la variance. Des exemples sont fournis par les classes 2 et 21 représentées par quatre sites au lieu de six. Cette situation est toutefois prise en considération lors de l'interprétation des résultats.



Figure 8 Représentation schématique du filtre requis pour dégrader la résolution spatiale de 50 cm à 150 cm à partir des sept coefficients d'amplitude correspondants. La portion centrale ombragée représente le pixel résultant de l'application du filtre de rééchantillonnage dans lequel se trouve incluse la proportion d'information provenant des pixels avoisinants due à la FTM du capteur.

2.2 Description des données MEIS-II du 29 octobre 1985

Les images MEIS-II d'automne utilisées pour mesurer l'impact du temps d'acquisition sur la résolution spatiale optimale ont été acquises le 29 octobre 1985, vers 11:00 heure locale, au-dessus du même secteur de la forêt expérimentale de Petawawa (Fig. 1).

Une comparaison avec les images d'été révèlent plusieurs différences significatives. D'abord, la résolution spatiale est de 75 cm comparativement à 50 cm lors du survol d'été. L'angle zénithal varie aussi grandement; il est d'environ 45^o pour les images d'été et de 62^o pour celles d'automne. Les zones d'ombre sont donc plus importantes sur ce dernier groupe d'images. Ensuite, les bandes spectrales sont beaucoup plus larges que les précédentes (Fig. 9; Tabl. 4). Elles correspondent en fait à des simulations des bandes TM1, HRV1, TM2, HRV2 et HRV3, respectivement. Une bande additionnelle, centrée à 665 nm et couvrant 85 nm, n'a pas été retenue pour l'étude à cause de sa mauvaise qualité radiométrique.

Toute la portion ascendante de la courbe de réflectance située en bordure du rouge et du proche-IR ne se trouve donc pas représentée par les bandes spectrales du survol d'automne, alors qu'elle est couverte de façon exhaustive par les bandes du survol d'été (Fig. 3; Tabl. 1). Cette portion du spectre électromagnétique fournit généralement une information reliée au stress de la végétation. Par ailleurs, les bandes spectrales du survol d'automne couvrent toute la région des longueurs d'onde du vert et du rouge sensibles aux différents types de pigment (en particulier la chlorophylle) des espèces. 20



Figure 9 Étendue spectrale des bandes MEIS-II du 29 octobre 1985 illustrées sur la courbe de réflectance standard de la végétation.

Tableau 4 Caractéristiques	des	bandes	spectrales	MEIS-II	du	29	octobre	1985	utilisées
pour l'étude.									

Numéro de la bande	Longueur d'onde centrale (nm)	Limite inférieure (nm)	Limite supérieure (nm)	Étendue spectrale (nm)
6	489	456	523	67
4	555	503	607	104
5	573	539	607	68
8	653	617	690	73
7	846	797	894	97

La corrélation entre les bandes spectrales du survol d'automne est élevée pour les cinq bandes, à l'exception de la bande 7, centrée à 846 nm, qui représente le plateau de forte réflectance du proche IR (Tabl. 5a). Par comparaison, certaines bandes du survol d'été sont moyennement corrélées (Tabl. 5b). Cette tendance est manifeste pour les bandes 4 et 2, qui correspondent aux maxima d'absorption du bleu et du rouge, respectivement, avec les bandes 5, 3 et 1 qui correspondent à la portion de réflectance croissante précédant le plateau du proche IR.

Tableau 5a Corrélation entre les bandes spectrales du survol d'automne (29 octobre 1985).

Bandes spectrales								
	6	4	5	8				
4	0.864							
5	0.896	0.958						
8	0.962	0.876	0.902					
7	0.283	0.476	0.542	0.300				

Tableau 5b Corrélation entre les bandes spectrales du survol d'été (29 août 1986).

Bandes spectrales							
	4	8	2	7	6	5	3
8	0.891						
2	0.963	0.894		-			
7	0.902	0.895	0.902				
6	0.757	0.867	0.735	0.913			
5	0.558	0.708	0.487	0.717	0.895		
3	0.514	0.687	0.452	0.676	0.870	0.987	
1	0.484	0.677	0.438	0.649	0.842	0.948	0.978

La procédure de création du filtre spatial appliqué aux images d'automne est identique à celle décrite à la section précédente. Cette décision repose sur la prémisse que la largeur des bandes spectrales n'influence pas de façon significative la FTM du capteur et que, dans le cas précis de notre étude, le centre des bandes ne diffère pas suffisamment d'une série d'images à l'autre pour modifier substantiellement les résultats de l'analyse.

Étant donné que les deux séries d'images n'ont pas été acquises exactement selon la même direction de vol, certains sites représentatifs des classes forestières sélectionnés sur les images d'été n'apparaissent pas sur les images d'automne. C'est le cas des classes 3 et 12, où aucun site n'est présent, et des classes 2, 15, 20 et 21 où le nombre de sites est réduit à 4 et à 3. Ce fait est pris en considération lors de l'interprétation des résultats.

2.3 Analyse de variance bivariée

L'analyse de variance bivariée est un outil statistique standard (Tabachnick and Fidell, 1983) basé sur le rapport de variances intra- et inter-classes qui, lorsqu'appliqué à deux ensembles de données représentant des classes indépendantes, permet de décider si ces deux classes sont significativement différentes. Cette analyse permet d'obtenir un portrait complet de la variance spectrale des classes forestières qui s'avère particulièrement utile dans un contexte de classification. En effet, dans l'espace spectral multidimensionnel, la variance intra-classe définit la dimension du nuage de points correspondant à chaque classe alors que la variance inter-classe indique la distance entre ces nuages de points. Le rapport des deux variances permet donc d'estimer la séparabilité spectrale de chaque classe par rapport à ses voisines.

Pour assurer la validité des résultats, seules les 16 classes sur les images d'été et les 10 classes sur les images d'automne comportant le même nombre de sites maximum, c'est-à-dire six, ont été comparées. Cette comparaison a été faite à la résolution spatiale préalablement définie comme optimale dans les différentes conditions d'acquisition de données pour chacune des classes considérées.

3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La présentation et l'analyse des résultats sont réalisées en deux parties. Dans la section 3.1, la relation entre la variance interne et la résolution spatiale dans chaque bande spectrale est illustrée et ce, pour chacune des trois conditions d'acquisition de données, soit FTM idéale et images d'été, FTM d'un capteur à barrette et images d'été et FTM d'un capteur à barrette et images d'été et FTM d'un capteur à barrette et accompagné d'une sous-image illustrant un des sites représentatifs de la classe forestière étudiée (Fig. 10 à 31). Le symbole # inscrit au-dessus de quelques graphiques indique que certains sites représentatifs de la classe n'ont pu être utilisés lors du ré-échantillonnage parce que situés à une distance trop faible de la bordure de l'image.

Dans le cas des images du 29 août 1986, la sous-image est extraite de la bande 1 de MEIS-II, centrée à 776 nm, alors que dans le cas des images d'automne, la sous-image provient de la bande 7, centrée à 846 nm. Ces deux bandes correspondent au plateau élevé dans le proche infrarouge de la courbe standard de réflectance de la végétation (Fig. 3 et 9). Il est à noter que la résolution spatiale des deux ensembles d'images est de 50 cm et 75 cm, respectivement. L'orientation de la ligne de vol n'étant pas la même dans les deux cas, les sous-images d'automne ont subi une rotation pour faciliter leur comparaison visuelle avec celles d'été. La fenêtre découpée sur la sous-image représente le voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale de la classe forestière, telle qu'indiquée par une flèche sur chaque graphique. Un tableau comparatif des résolutions spatiales optimales identifiées pour chaque classe forestière dans les trois conditions d'acquisition de données complète cette section. Finalement, l'interprétation de l'analyse de variance bivariée réalisée afin d'évaluer la séparabilité spectrale des classes forestières est fournie à la section 3.2.

3.1 Interprétation des courbes de la variance spectrale en fonction de la résolution spatiale et identification de la résolution spatiale optimale

L'interprétation détaillée des courbes de variance en fonction de la résolution spatiale pour le cas du filtre moyen de ré-échantillonnage appliqué sur les images d'été a déjà été présentée lors de la première étape de l'étude (Marceau *et al.*, 1992). L'essentiel des conclusions a été repris dans l'introduction du présent rapport. Le comportement de la variance avait toutefois été étudié pour des résolutions spatiales n'excédant pas la dimension du plus petit site représentatif de chaque classe. Un ré-examen de ces résultats a mis en évidence l'intérêt de prolonger le calcul de la variance jusqu'à la résolution de 30 m afin d'obtenir un portrait plus complet de chaque classe et de faciliter la comparaison entre les classes. De plus, cette étendue de résolutions spatiales s'accorde mieux avec la définition de l'objet géographique d'intérêt, c'est-à-dire un peuplement forestier.

Ainsi, le prolongement des courbes jusqu'à la résolution de 30 m pour les trois classes de peupliers faux-trembles (Fig. 11 à 14) a permis d'identifier que la baisse la plus marquée de la variance se produit à des résolutions de 1950 m, 2250 m et 1750 m, respectivement. La première baisse de la variance à des résolutions beaucoup plus fines est moins importante et correspond probablement à l'agrégation d'un petit nombre de couronnes à l'intérieur du peuplement.

Comparaison des courbes obtenues à l'aide du filtre moyen avec celles obtenues à partir du filtre simulant la FTM du capteur pour les images du 29 août 1986

La comparaison des courbes obtenues à l'aide du filtre moyen avec celles obtenues à partir du filtre simulant la FTM du capteur appliqués aux images d'été pour l'ensemble des classes forestières révèle deux observations importantes. La première est que le profil général des courbes est semblable, à la différence que les oscillations de la variance présentes dans le premier groupe sont considérablement atténuées dans le second groupe. La deuxième observation est que la résolution spatiale optimale des classes se déplace vers des résolutions plus fines lorsque le filtre simulant la FTM du capteur est appliqué sur les images. Ces deux effets combinés sont particulièrement manifestes chez les peuplements naturels, tels qu'illustrés par les peupliers faux-trembles (Fig. 11 à 13), les pins gris (Fig. 21 et 22) et les peuplements mixtes (Fig. 30 et 31). Dans le cas des pins rouges, le déplacement du profil général des courbes est apparent, mais n'affecte pas significativement la résolution spatiale optimale (Fig. 24 et 25).

Dans le cas des plantations, cette tendance se manifeste dans les deux cas où la variabilité des sites est la plus grande, c'est-à-dire lorsque la densité est très élevée, ce qui perturbe les couronnes des arbres, (Fig. 14 et 15) et lorsque la densité est faible (Fig. 19, 26 et 28). Lorsque les plantations sont très homogènes, à des densités moyennes, le profil général des deux séries de courbes varie peu et le déplacement de la résolution spatiale optimale n'est pas significatif (Fig. 16 à 18 et 23).
Le lissage du profil des courbes et le déplacement de la résolution optimale vers des résolutions plus fines suite à l'application du filtre simulant la FTM du capteur s'explique de la façon suivante. Lors du processus de ré-échantillonnage, la valeur du pixel résultant comprend non seulement l'information provenant des pixels à la résolution plus fine correspondant à la même surface au sol, mais aussi une proportion de l'information provenant des pixels avoisinants (Fig. 8). Un tel recoupement a pour conséquence de réduire la variance des valeurs de luminance enregistrée au capteur. En d'autres termes, ce filtre agit comme un filtre passe-bas en atténuant les hautes fréquences sur l'image résultante.

Au même moment, ce filtre spatial élargit en quelque sorte la surface au sol normalement représentée par un pixel à une partie de la surface couverte par des pixels voisins. Ainsi, une résolution spatiale optimale identifiée à 1250 cm délimite en fait une surface au sol correspondant à 2350 cm lorsque l'effet du voisinage de pixels déterminé par le filtre est considéré. Cet exemple est fourni par la classe 20 (Fig. 30) et révèle que les surfaces au sol délimitées à la résolution spatiale optimale par le filtre moyen et le filtre simulant la FTM sont à peu près équivalentes et correspondent à 2150 cm et 2350 cm, respectivement.

Interprétation des courbes obtenues à l'aide du filtre simulant la FTM du capteur pour les images du 29 octobre 1985

L'observation des courbes obtenues à l'aide du filtre simulant la FTM du capteur pour les images d'automne révèle un profil typique caractérisé par très peu d'oscillations, une baisse rapide de la variance jusqu'à environ 10 m de résolution, suivie d'une séquence linéaire de valeurs de variance très faibles (Fig. 14, 16, 18, 19, 21, 26, 30 et 31).

Pour les classes de feuillus, aucune résolution spatiale optimale n'a pu être identifiée (Fig. 11 et 12). Ce comportement s'explique par l'activité phénologique réduite et l'homogénéisation du fond de scène associées à ce temps particulier de l'année.

Pour la plupart des peuplements de conifères, la résolution spatiale optimale s'avère plus élevée pour les images d'automne que pour les deux autres groupes d'images (Fig. 16 à 21, 23 et 25). Toutefois, contrairement aux résultats obtenus à partir des images d'été, il n'est pas possible d'établir une relation stable entre la résolution spatiale optimale et des caractéristiques des peuplements. En effet, la variance des classes de conifères est probablement due au comportement différentiel des arbres face au stress engendré par le froid et la longueur réduite des jours. Dans certains cas, la variance s'explique par la présence accrue de zones d'ombre liées à l'angle zénithal solaire plus prononcé lors du survol d'automne (Fig. 19).

Résolutions spatiales optimales identifiées pour chaque classe forestière dans les trois conditions d'acquisition de données

Un tableau de synthèse des résolutions spatiales optimales identifiées pour chaque classe forestière dans les trois conditions d'acquisition de données révèle que, pour la majorité des classes, les résolutions optimales se situent entre 5 m et 20 m (Tabl. 6).

Tableau 6 Résolutions spatiales optimales identifiées pour chaque classe forestière selon les trois conditions d'acquisition de données. L'astérique indique que la résolution a été obtenue à partir d'un nombre plus restreint de sites que celui utilisé lors du calcul avec le filtre moyen.

Classe	Filtre moyen 29 août 1986	Filtre simulant la FTM du capteur 29 août 1986	Filtre simulant la FTM du capteur 29 octobre 1985
1	1950 cm	950 cm	
2	2250 cm	*1250 cm	
3	1750 cm	1150 cm	
4	650 cm	450 cm	375 cm
5	1550 cm	1050 cm	1125 cm
6	350 cm	450 cm	1575 cm
7	950 cm	950 cm	2475 cm
8	1050 cm	1150 cm	1875 cm
9	450 cm	250 cm	1575 cm
10	450 cm	350 cm	1425 cm
11	650 cm	450 cm	825 cm
12	950 cm	650 cm	
13	250 cm	250 cm	2325 cm
14	350 cm	350 cm	525 cm
15	750 cm	650 cm	*2475 cm
16	2550 cm	1650 cm	375 cm
17	1450 cm	1750 cm	1275 cm
18	2050 cm	1650 cm	975 cm
19	1050 cm	1350 cm	525 cm
20 21	2150 cm 1650 cm	1250 cm *450 cm	*975 cm *1575 cm
		-+J0 CIII	1575 CIII

Lorsque comparées aux résolutions obtenues à partir du filtre moyen, les résolutions optimales déterminées à l'aide du filtre simulant la FTM du capteur appliqué aux images d'été tendent à être plus fines. Ce déplacement est de l'ordre d'environ 5 m. La comparaison entre les résultats provenant du filtre simulant la FTM appliqué aux images d'été et ceux obtenus à partir des images d'automne montre que, dans le deuxième cas, les résolutions spatiales optimales sont plus grossières. Le déplacement moyen correspond à une dizaine de mètres.







Figure 11 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).





Figure 12 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 13 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 14 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 15 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 16 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 17 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 les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).

32



Figure 18 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 8 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 19 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 9 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 20 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 20 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 21 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 11 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).





Variance Résolution spatiale (cm)



Figure 22 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 12 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 23 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 13 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 24 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 14 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 25 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 15 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 26 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 16 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 27 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 17 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).





Figure 28 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 18 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 29 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 19 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).



Figure 30 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 20 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).

Pins-Peupliers (mixte à tendance résineuse), hauteur: 4, densité: 2, naturel





Figure 31 Variance spectrale en fonction de la résolution spatiale pour la classe forestière 21 et voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale délimité sur un site représentatif pour les trois conditions d'acquisition de données (légendes à la figure 10).

3.2 Séparabilité spectrale des classes forestières

La séparabilité spectrale des classes forestières est analysée de deux façons. Premièrement, les résultats du test de variance bivariée pour chaque classe forestière considérée à sa résolution spatiale optimale sont présentés. Ce test permet de vérifier si les classes sont spectralement discriminables et d'identifier les bandes spectrales les plus utiles pour cette discrimination. Deuxièmement, à partir de deux exemples jugés les plus représentatifs, le profil de la séparabilité spectrale de deux classes, exprimé par la valeur F du test de variance, en fonction de la résolution spatiale est tracé pour chacune des bandes spectrales. Ce profil permet de suivre l'évolution de la séparabilité spectrale de part et d'autre du seuil critique fixé par le test et d'illustrer l'importance de la résolution spatiale optimale afin d'assurer une séparabilité maximale des classes.

Séparabilité spectrale des classes forestières à leur résolution spatiale optimale

Les tableaux 7 à 47 contiennent l'ensemble des résultats des analyses de variance bivariées obtenus pour chacune des conditions d'acquisition de données. La valeur critique du test, pour un seuil de confiance de 95% et des degrés de liberté de 1 et 10, est 4,96. Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les cas où deux classes forestières ne sont pas significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales, pour les résolutions spatiales optimales des deux classes considérées, sont représentés en caractères gras. Il est à noter que, pour certaines paires de classes, le test de séparabilité n'a pu être appliqué à la résolution spatiale optimale respective de chacune des classes; certains sites représentatifs se trouvant en bordure de l'image ont limité la procédure de ré-échantillonnage spatial.

Dans le cas du filtre moyen appliqué aux images d'été, toutes les classes sont significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales, à l'exception des classes: 2 et 3 (Tabl. 8 et 9), 4 et 9 (Tabl. 10 et 15), 6 et 7 (Tabl. 12 et 13), 6 et 14 (Tabl. 12 et 19), 6 et 15 (Tabl. 12 et 20), 7 et 14 (Tabl. 13 et 19), 7 et 15 (Tabl. 13 et 20), 8 et 20 (Tabl. 14 et 21), 10 et 11 (Tabl. 16 et 17), 11 et 20 (Tabl. 17 et 21) et 14 et 15 (Tabl. 19 et 20). La variable la plus commune à ces paires de classes est l'espèce. En effet, les classes 2 et 3 sont des peupliers faux-trembles, les classes 4 et 9, 6 et 7 ainsi que 10 et 11 sont des pins gris, les classes 14 et 15 sont des pins rouges. Certaines classes de pins gris (6 et 7) se confondent spectralement avec des pins rouges (14 et 15) alors que d'autres (8 et 11) se confondent avec de la forêt mixte à tendance coniférienne (20).

Dans le cas où la discrimination se produit dans une bande spectrale seulement, ce sont les bandes centrées à 548 nm et 710 nm qui assurent la séparabilité des classes. Ces bandes correspondent au pic de réflectance du vert et à la frontière entre le rouge et le proche IR, respectivement.

Lorsque le filtre simulant la FTM du capteur est appliqué aux images d'été, toutes les classes sont significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales, à l'exception des classes: 4 et 9 (Tabl. 26 et 31), 6 et 7 (Tabl. 28 et 29), 6 et 14 (Tabl. 28 et 35), 6 et 15 (Tabl. 28 et 36), 7 et 14 (Tabl. 29 et 35), 7 et 15 (Tabl. 29 et 36), 8 et 20 (Tabl. 30 et 37), 10 et 11 (Tabl. 32 et 33) et 14 et 15 (Tabl. 35 et 36). Ces paires de classes appartiennent toutes au groupe précédemment décrit. Seules deux classes non significativement différentes lors de l'application du filtre moyen sont dorénavant spectralement discriminables. Il s'agit des classes de peupliers faux-trembles (classes 2 et 3, Tabl. 24 et 25). Dans le cas des classes de pins gris et de forêt mixte à tendance coniférienne (classes 11 et 20, Tabl. 33 et 37), le test de séparabilité n'a pu être mené qu'à la résolution spatiale optimale de la classe 11 et révèle une confusion spectrale dans toutes les bandes.

Les bandes spectrales qui interviennent le plus souvent dans les cas où les classes sont significativement différentes dans une seule bande sont celles centrées à 548 nm et à 776 nm, correspondant au pic de réflectance du vert et au plateau de réflectance élevée du proche IR, respectivement.

Dans le cas des images d'automne, toutes les classes sont significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales, sauf les classes: 4 et 9 (Tabl. 38 et 43), 5 et 8 (Tabl. 39 et 42), 5 et 11 (Tabl. 39 et 45), 5 et 13 (Tabl. 39 et 46), 6 et 14 (Tabl. 40 et 47), 8 et 11 (Tabl. 42 et 45), 8 et 13 (Tabl. 42 et 46), 10 et 11 (Tabl. 44 et 45), 11 et 13 (Tabl. 45 et 46), 11 et 14 (Tabl. 45 et 47). La confusion spectrale existe essentiellement entre des classes de pins gris et des paires formées d'une classe de pins gris et d'une classe de pins rouges. Dans le premier cas, les paires de classes qui ne se distinguent que dans une bande spectrale appartiennent aussi à la même classe de hauteur. Ainsi, les classes 4 et 9 appartiennent à la classe de hauteur 1 alors que les classes 5 et 8, 5 et 11, 10 et 11 appartiennent à la catégorie de hauteur 2. Les classes de pins gris 8 et 11 qui ne se discriminent dans aucune bande spectrale appartiennent à la fois à la même catégorie de hauteur (2) et de densité (2).

La longueur d'onde centrale la plus importante lors de la séparabilité des classes dans une bande unique est 846 nm, correspondant au plateau de réflectance élevée du proche-IR, suivie par 653 nm et 555 nm correspondant au maximum d'absorption du rouge et au pic de réflectance du vert, respectivement.

Ces résultats démontrent, qu'à leur résolution spatiale identifiée comme optimale, la grande majorité des classes forestières considérées dans l'étude sont significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales. Contrairement à l'identification de la résolution spatiale optimale où les caractéristiques spatiales des classes jouent un rôle prépondérant, la variable la plus importante lors de la discrimination spectrale est l'espèce. En effet, la résolution spatiale optimale est étroitement associée à l'agrégation particulière des éléments au sol à l'intérieur de la surface délimitée par cette résolution. D'où l'importance des variables caractérisant la distribution et l'organisation spatiales des objets géographiques d'intérêt dans l'identification de la résolution la plus appropriée pour leur détection.

Lorsque les objets géographiques d'intérêt sont considérés à leur résolution spatiale optimale, la variable la plus importante pour assurer leur discrimination devient alors la propriété physique de l'objet, c'est-à-dire, dans le cas de peuplements forestiers, les différents pigments qui composent les parties d'un arbre, qui changent selon l'espèce, et qui réfléchissent une quantité variable d'énergie électromagnétique en fonction de la longueur d'onde. Dans un tel contexte, le choix des bandes spectrales devient primordial pour assurer la séparabilité des classes.

Dans le cas des images d'automne, l'activité phénologique étant très réduite à ce temps de l'année, la réponse spectrale exprime alors le comportement différentiel des arbres à différents types de stress. Il est probable que les arbres d'une même espèce et de hauteur semblable, en l'occurence des conifères, traduisent des manifestations d'adaptation au stress semblables, ce qui les rend plus difficiles à discriminer. Tableau 7 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 1.

<u></u>	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
2	6.01	4.61	2.96	22.92	8.21	4.33	3.22	3.50
3	4.86	7.04	9.85	17.19	18.26	1.97	0.22	0.00
4	0.54	2.49	10.12	1.09	4.31	66.40	98.60	106.65
5	276.44	112.97	131.95	357.71	199.55	269.55	342.67	370.13
6	37.48	14.14	9.44	32.24	38.44	84.30	86.37	82.51
7	60.00	33.66	52.44	76.75	138.76	169.38	181.30	200.97
8	36.34	69.01	36.45	82.92	170.86	255.38	396.16	489.91
9	0.48	0.12	18.38	2.21	5.15	72.99	114.33	115.34
10	266.50	210.09	183.99	39.38	114.43	330.21	468.65	531.42
11	138.50	192.03	111.07	28.12	57.17	212.43	252.47	296.40
13								
14	30.18	49.66	56.46	74.71	139.86	160.84	231.17	272.42
15	21.01	74.26	39.85	35.38	124.04	147.47	224.98	244.47
20	19.54	39.35	22.40	65.05	103.90	165.73	225.52	288.09
21	39.64	19.67	17.15	16.87	14.18	40.73	43.20	36.18

Classe 1: Peupliers faux-trembles, hauteur: 1, densité: 5, naturel Résolution spatiale optimale: 1950 cm

Tableau 8 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 2.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	4.85	3.75	2.53	19.02	7.64	3.32	2.33	2.44
3	0.79	2.29	2.93	1.24	1.63	1.45	2.12	2.89
4	10.66	51.81	20.47	33.42	2.36	4.61	6.39	7.32
5	171.93	433.88	83.74	296.68	194.77	42.06	38.93	43.24
6	19.22	9.51	3.83	12.10	21.41	19.94	19.15	20.07
7	30.22	38.15	29.54	36.78	133.04	26.39	28.83	30.61
8	15.13	395.01	22.55	40.40	172.21	40.22	47.08	60.37
9	5.80	1.38	30.81	31.09	2.48	6.20	8.85	9.55
10	206.67	1801.52	168.48	12.30	86.90	57.92	62.56	76.12
11	97.06	1274.60	80.39	10.22	33.85	52.45	54.85	66.36
13								
14	12.94	154.28	37.28	33.04	122.67	27.99	30.20	36.01
15	10.38	499.96	27.45	14.95	107.49	31.68	36.60	41.76
20	11.07	36.00	13.66	35.11	82.18	46.13	50.03	60.75
21	20.27	43.34	9.36	3.21	4.54	5.15	5.26	4.88

Classe 2: Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 3, naturel Résolution spatiale optimale: 2250 cm

Tableau 9 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 3.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	4.72	6.99	9.73	17.20	17.28	2.87	0.65	0.09
2	0.80	2.38	3.23	1.16	1.34	1.23	1.88	2.50
4	6.20	20.39	26.42	21.37	8.01	45.27	74.48	61.15
5	25.43	36.61	37.89	69.46	369.75	228.34	263.51	194.05
6	3.75	1.86	0.27	4.91	16.05	64.71	72.99	64.04
7	3.80	5.82	5.44	10.12	195.92	142.43	153.56	132.54
8	1.66	16.07	4.79	11.68	247.44	213.67	302.33	249.22
9	5.06	3.27	40.12	23.60	6.50	49.95	84.88	66.24
10	25.20	86.46	62.19	4.45	105.10	279.19	353.79	278.19
11	21.44	76.66	36.31	5.37	31.87	180.37	213.76	202.96
13								
14	3.01	9.52	9.59	14.02	149.66	130.66	181.66	154.61
15	2.44	15.70	7.06	7.13	108.77	120.24	184.50	155.10
20	3.61	12.30	4.79	16.50	62.40	118.82	166.20	172.58
21	1.50	0.71	0.28	0.62	2.32	31.11	40.34	32.87

Classe 3: Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 1750 cm

Tableau 10 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 4.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	1.17	2.47	14.65	1.10	4.33	83.19	117.55	134.44
2	8.44	46.83	22.46	35.53	0.13	5.23	6.32	7.03
3	7.67	26.43	36.64	26.27	8.36	10.07	19.45	21.16
5	471.17	760.12	137.17	749.44	651.42	92.01	95.49	93.14
6	62.97	42.61	38.15	57.49	34.38	11.55	8.78	8.16
7	99.54	124.49	78.27	123.21	233.06	34.93	28.41	32.20
8	43.63	273.27	56.27	124.84	426.45	102.73	162.49	195.33
/ 9	0.19	2.47	2.13	0.96	0.10	1.20	1.98	1.61
10	414.74	1973.89	168.89	63.43	257.93	203.47	299.65	372.54
11	171.88	1658.76	115.43	41.50	61.52	84.64	92.27	121.48
13	225.69	609.01	140.13	121.43	182.45	39.43	32.06	22.71
14	38.70	214.25	77.42	97.12	199.11	32.20	35.74	39.87
15	33.18	565.22	65.39	58.29	337.35	57.07	83.12	87.44
20	15.29	56.61	33.60	45.63	41.07	22.01	25.09	28.58
21	14.01	20.58	28.34	26.29	8.11	0.73	0.33	0.38

Classe 4: Pins gris, hauteur: 1, densité: 4, plantation Résolution spatiale optimale: 650 cm

Tableau 11 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 5.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	280.79	96.33	133.55	285.79	162.65	366.25	441.49	486.32
2	251.22	290.49	163.50	261.83	121.70	29.96	28.11	29.73
3	22.18	31.75	33.59	61.64	233.30	174.80	216.66	171.26
4	233.13	435.10	90.29	296.82	414.89	302.74	372.02	348.03
6	18.99	10.75	14.51	10.89	7.29	4.68	4.24	4.36
7	59.58	28.92	206.57	28.83	47.25	17.62	6.32	3.50
8	56.91	16.59	18.36	29.29	4.81	1.40	10.80	33.59
9	99.19	56.19	146.84	285.16	300.09	127.23	117.95	89.54
10	0.22	111.16	48.11	23.35	13.35	36.61	78.73	86.56
11	0.00	60.19	1.85	5.31	0.83	10.19	15.48	22.03
13	0.00	23.00	7.91	7.94	3.54	1.88	1.61	3.13
14	16.88	25.67	15.44	10.38	3.93	6.32	4.09	2.30
15	15.89	31.20	17.25	8.68	4.39	5.89	2.97	2.18
20	1.88	0.31	0.89	0.56	0.05	1.64	3.64	5.64
21	47.41	78.34	37.54	25.97	22.05	32.62	30.34	22.80

Classe 5: Pins gris, hauteur: 2, densité: 4, plantation Résolution spatiale optimale: 1450 cm

Tableau 12 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 6.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	42.10	11.49	8.87	30.22	31.57	94.32	90.51	82.04
2	19.62	11.84	5.03	14.82	20.03	14.58	13.79	13.99
3	1.71	0.60	0.00	2.86	7.51	25.11	32.35	31.89
4	67.74	43.43	37.83	62.14	36.30	12.03	8.96	8.18
5	23.75	12.18	17.78	12.59	7.82	5.77	5.05	4.29
7	0.00	0.35	1.61	0.08	1.76	0.64	0.89	1.31
8	1.36	2.65	0.79	0.04	4.27	4.00	7.98	10.42
9	45.39	11.46	71.99	62.33	23.01	5.34	2.67	2.03
10	22.97	41.80	31.71	0.19	1.58	16.73	21.60	22.87
11	11.93	32.98	15.58	0.05	1.55	13.19	15.62	17.91
13	13.78	23.97	24.09	0.94	1.97	0.76	0.55	0.12
14	0.00	1.35	3.17	0.81	3.67	1.38	1.97	2.15
15	0.00	4.25	2.73	0.42	5.20	2.32	3.39	3.20
20	0.38	3.50	1.90	2.20	3.67	5.94	7.18	7.80
21	1.46	1.09	0.43	3.12	4.33	4.59	4.58	3.71

Classe 6: Pins gris, hauteur: 1, densité: 3, plantation Résolution spatiale optimale: 550 cm

Tableau 13 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 7.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	62.66	25.68	38.61	57.83	83.10	233.11	220.54	235.40
2	45.04	43.44	53.34	32.66	63.11	18.75	18.23	19.39
3	2.76	4.65	4.16	7.50	46.63	55.60	67.89	66.02
4	71.15	127.05	60.80	93.20	266.18	60.66	41.89	44.07
5.	48.13	21.05	73.36	22.90	10.40	5.59	2.39	1.08
6	0.01	0.61	2.25	0.15	2.23	0.76	1.12	1.79
8	1.88	2.39	0.00	0.00	3.12	4.68	8.26	10.66
9	45.76	23.51	133.67	109.70	131.63	29.33	18.11	17.85
10	53.51	111.89	156.07	0.57	0.01	41.70	35.80	35.72
11	18.98	78.85	24.00	0.00	0.01	18.66	17.73	20.17
13	23.43	59.15	48.89	_ 1.04	0.29	0.51	0.06	0.22
14	0.03	0.78	2.48	0.71	1.32	0.15	0.22	0.18
15	0.15	1.40	0.20	0.01	0.88	0.03	0.32	0.13
20	0.18	2.03	0.38	1.65	1.22	3.45	4.31	4.91
21	0.83	2.01	2.04	2.80	10.92	11.58	10.77	9.29

Classe 7: Pins gris, hauteur: 2, densité 3, plantation Résolution spatiale optimale: 950 cm

Tableau 14 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 8.

Classe 8: Pins gris, hauteur: 2, densité 2, plantation	
Résolution spatiale optimale: 1050 cm	

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	37.75	40.61	27.13	64.28	102.28	343.86	454.90	526.88
2	22.54	81.21	27.80	35.03	77.71	23.72	26.99	30.64
3	1.19	11.25	3.61	8.52	82.50	87.20	126.63	117.21
4	39.95	204.31	48.41	98.23	345.06	187.19	322.76	345.77
5	61.85	12.80	16.04	31.08	3.41	0.57	4.82	12.98
6	1.05	3.11	1.70	0.12	4.79	4.07	8.86	12.99
7	1.84	2.54	0.01	0.00	3.92	5.83	9.65	11.98
9	28.47	35.65	95.96	113.77	173.10	77.45	93.12	83.09
10	65.72	119.05	41.48	0.56	2.62	52.46	44.26	26.15
11	26.69	73.48	13.68	0.00	0.19	11.59	8.07	7.49
13	34.04	53.36	24.81	1.26	0.32	0.61	5.23	11.41
14	1.22	0.46	1.27	0.91	0.01	1.85	6.75	10.50
15	0.17	0.41	0.07	0.01	0.33	4.51	18.59	35.44
20	0.78	0.53	0.33	1.85	0.39	1.52	1.00	0.72
21	0.00	8.32	1.85	2.87	15.67	25.84	36.25	32.59

Tableau 15 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 9.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	1.05	0.14	32.45	1.28	4.51	84.39	99.91	83.02
2	7.72	2.68	62.50	53.81	0.20	6.76	8.19	8.13
3	12.40	8.36	123.20	45.48	4.27	16.71	29.83	29.52
4	0.05	6.36	1.93	0.18	1.37	2.36	3.50	2.94
5	213.14	87.06	435.96	672.73	151.96	36.10	28.89	21.17
6	50.68	12.99	86.45	69.25	24.01	4.78	2.41	1.84
7	50.50	24.72	194.73	103.89	76.80	13.35	9.09	8.24
8	25.28	43.29	113.67	100.56	105.67	30.37	36.63	34.64
10	194.50	165.59	495.09	66.12	85.49	74.08	82.09	69.75
11	93.38	143.16	234.20	40.06	34.18	33.81	33.69	35.99
13	145.88	106.29	371.82	140.10	81.88	14.77	8.36	4.04
14	48.19	40.63	251.14	160.05	118.64	19.62	16.33	12.80
15	23.40	52.26	101.79	48.86	81.19	15.72	14.57	11.30
20	22.31	29.38	66.22	59.10	39.29	21.75	20.46	18.82
21	8.35	3.18	45.58	29.62	3.99	0.11	0.83	0.60

Classe 9: Pins gris, hauteur 1, densité 1, plantation Résolution spatiale optimale: 450 cm

Tableau 16 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 10.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	217.38	82.39	77.82	24.89	57.41	415.87	495.00	493.10
2	87.92	659.86	72.69	9.77	55.04	38.47	41.11	48.93
3	19.26	63.61	45.73	1.77	32.21	88.19	134.99	146.37
4	440.11	1230.95	158.43	66.31	209.89	151.21	218.96	277.38
5	0.33	58.26	7.81	21.89	11.10	2.65	11.25	14.39
6	17.16	35.97	24.29	0.41	0.99	12.77	15.84	15.72
7	21.85	68.62	41.12	0.70	0.12	18.98	20.04	17.54
8	26.98	109.48	21.33	0.47	2.07	19.83	18.51	14.25
9	194.50	165.59	495.09	66.12	85.49	74.08	82.09	69.75
11	0.00	3.34	0.55	0.46	0.25	0.63	0.39	0.43
13	0.48	5.86	0.12	2.52	0.20	26.14	38.58	46.96
14	18.75	186.22	38.41	2.64	2.10	17.00	24.42	21.69
15	6.01	79.03	7.07	1.28	3.12	4.94	7.33	7.38
20	1.04	6.24	2.06	4.75	3.09	0.60	0.23	0.08
21	13.01	37.70	24.45	2.05	14.70	39.26	60.78	60.17

Classe 10: Pins gris, hauteur: 2, densité: 3, naturel Résolution spatiale optimale: 450 cm

Tableau 17 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 11.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	121.11	113.26	70.29	25.90	50.78	242.52	274.43	324.07
2	92.78	661.05	72.17	12.65	38.40	38.02	39.39	46.96
3	11.23	45.90	17.24	2.83	17.41	64.80	88.92	97.77
4	171.88	1658.76	115.43	41.50	61.52	84.64	92.27	121.48
5	0.00	47.66	0.62	6.44	1.07	7.47	12.03	17.42
6	13.09	34.80	16.76	0.05	1.71	14.56	18.00	22.80
7	18.93	65.76	20.20	0.00	0.10	16.05	16.34	18.65
8	24.14	66.56	10.81	0.00	0.19	10.73	7.78	6.65
9	96.51	93.26	168.95	43.52	41.77	59.21	53.50	55.42
10	0.13	8.48	2.59	0.31	0.12	0.68	0.37	0.47
13	0.04	0.79	1.04	0.42	0.01	14.22	18.67	26.73
14	8.56	73.50	7.87	0.33	0.13	9.83	11.94	14.78
15	8.80	152.75	6.68	0.08	0.25	13.15	15.75	21.54
20	1.85	6.79	1.78	1.13	0.51	0.17	0.31	0.53
21	12.41	37.60	16.07	2.43	9.68	36.59	43.89	44.71

Classe 11: Pins gris, hauteur: 2, densité 2, naturel Résolution spatiale optimale: 650 cm

Tableau 18 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 13.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	85.56	60.06	91.84	51.90	53.99	127.67	118.81	74.66
2	56.61	127.66	83.74	21.27	30.76	13.33	13.41	11.43
3	33.77	43.03	45.86	17.28	49.98	62.05	71.50	51.39
4	378.76	400.57	150.97	183.49	167.36	33.29	28.75	17.07
5	1.45	6.38	3.38	12.08	9.18	7.58	7.03	6.10
6	7.57	16.70	16.72	0.36	1.15	0.17	0.17	0.04
7	7.85	25.91	14.31	0.26	0.02	0.11	0.38	1.11
8	26.46	57.84	20.22	1.74	0.21	1.05	6.74	8.80
9	82.72	124.39	259.13	109.76	69.42	7.44	5.84	4.36
10	0.08	5.71	0.00	2.53	0.29	15.58	29.48	33.58
11	2.34	8.53	0.89	0.03	1.27	14.48	20.40	29.81
14	19.83	36.12	35.41	0.02	0.27	0.01	0.05	0.19
15	1.38	5.79	1.99	0.00	0.94	0.53	0.92	1.20
20	0.12	0.17	0.03	5.00	7.62	14.76	15.88	19.48
21	9.25	18.44	19.51	8.88	12.54	6.18	6.73	3.16

Classe 13: Pins rouges, hauteur: 2, densité: 2, plantation Résolution spatiale optimale: 250 cm

Tableau 19 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 14.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande I
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	49.48	22.11	33.90	54.88	66.22	213.20	204.68	135.16
2	17.41	67.06	27.56	37.26	61.04	19.03	19.30	19.68
3	2.74	5.21	6.59	14.72	58.27	56.94	75.99	66.10
4	90.73	229.11	92.25	235.91	271.22	43.67	42.86	30.60
5	33.17	34.40	27.87	17.37	6.64	6.08	3.45	1.05
6	0.27	0.47	1.90	0.41	2.27	0.63	0.90	1.01
7	0.01	0.14	0.60	0.46	0.36	0.05	0.01	0.03
8	1.89	0.24	1.61	1.54	0.05	0.35	2.26	1.78
9	48.84	45.65	299.28	190.02	115.38	15.65	13.38	10.42
10	21.27	192.55	49.30	2.94	2.29	17.34	22.49	13.35
11	11.86	122.58	11.74	0.05	0.03	8.04	9.75	10.44
13	16.98	63.32	32.82	0.00	0.53	0.35	1.20	2.48
15	0.04	2.12	0.03	0.01	0.55	0.28	0.35	0.16
20	2.58	5.84	1.61	3.06	3.39	8.92	8.79	7.28
21	1.21	3.56	4.60	9.54	18.51	10.05	13.11	9.94

Classe 14: Pins rouges, hauteur: 3, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 350 cm

Tableau 20 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 15.

Classe 15: Pins rouges, hauteur: 3, densité: 1, naturel
Résolution spatiale optimale: 750 cm

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	22.78	41.86	26.84	35.54	94.44	258.05	381.83	456.12
2	14.56	120.75	24.63	18.84	85.56	22.13	23.29	24.90
3	1.16	7.54	2.93	4.57	37.88	43.01	65.27	64.81
4	30.61	344.38	59.47	55.02	319.88	66.23	110.73	137.95
5	12.68	14.39	7.06	6.68	1.54	3.11	1.01	0.43
6	0.04	3.09	2.54	0.23	4.31	1.54	3.08	3.67
7	0.05	2.17	0.36	0.07	1.45	0.29	0.65	0.25
8	0.52	0.03	0.29	0.09	0.01	2.81	14.58	27.36
9	25.48	35.11	102.43	60.52	123.90	37.96	38.55	31.06
10	14.78	151.42	21.97	0.70	1.76	39.71	91.12	107.48
11	9.97	104.24	7.47	0.05	0.13	17.50	20.65	29.33
13	10.42	50.02	14.81	0.26	0.34	0.00	0.67	1.95
14	0.07	0.33	0.10	0.16	0.00	0.00	0.01	0.01
20	0.20	0.43	0.04	0.80	0.26	2.56	3.06	4.02
21	0.45	5.91	2.73	2.99	15.44	15.11	19.55	13.91

Tableau 21 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 20.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	19.77	38.40	21.77	63.96	108.90	157.72	216.97	279.37
2	11.25	37.61	13.95	35.72	83.61	46.17	50.05	60.90
3	4.15	12.43	4.96	17.67	77.94	146.84	190.37	190.83
4	23.75	74.72	41.89	73.48	112.79	82.09	103.70	136.22
5	2.69	0.42	1.32	0.69	0.27	4.76	9.95	17.01
6	0.36	3.76	2.51	2.91	6.02	8.75	11.84	14.85
7	0.78	4.34	1.52	4.36	6.17	14.14	16.07	19.05
8	2.11	1.07	0.95	3.65	1.51	5.66	3.54	2.42
9	19.39	24.69	53.92	73.37	120.00	65.26	83.58	112.04
10	3.20	13.87	7.18	5.25	4.61	0.03	0.11	0.48
11	2.65	9.22	3.42	1.69	1.20	0.38	0.69	1.35
13								
14	0.54	2.32	0.10	1.36	1.91	10.05	14.32	18.86
15	0.24	0.50	0.03	0.96	0.31	4.23	5.27	7.23
21	1.92	13.46	3.84	8.78	16.97	31.84	38.21	38.41

Classe 20: Pins - Peupliers (mixte à tendance résineuse), hauteur: 4, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 2150 cm

Tableau 22 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre moyen pour la classe forestière 21.

Classe 21: Peupliers - Pins (mixte à tendance feuillue), hauteur: 4, densité: 2, nature	l
Résolution spatiale optimale: 1650 cm	

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande I
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	32.41	18.50	14.72	17.33	16.00	57.58	62.16	53.20
2	14.22	16.79	7.01	3.28	4.51	5.83	6.09	6.00
3	1.40	0.68	0.23	0.62	2.42	31.44	41.01	33.54
4	33.54	66.25	31.28	20.72	8.00	1.04	0.28	0.14
5	56.39	80.13	38.19	26.12	22.47	36.33	34.54	26.37
6	1.38	0.78	0.02	1.58	2.82	6.56	6.04	5.00
7	1.46	5.49	3.57	2.91	11.14	14.88	14.79	14.17
8	0.02	25.52	3.34	3.50	17.00	31.61	46.24	45.14
9	19.61	8.22	49.08	23.25	7.26	0.08	0.13	0.09
10	52.80	210.92	63.99	1.01	9.92	57.90	70.79	62.07
11	29.28	186.98	33.63	2.09	8.03	45.97	51.50	51.76
13								
14	0.84	11.41	7.62	5.12	13.82	14.53	18.07	16.84
15	0.40	21.92	4.91	2.67	14.26	15.97	22.98	20.16
20	1.44	10.92	3.30	7.88	14.47	25.62	33.13	35.66

Tableau 23 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 1.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
2								
3	4.55	6.68	8.87	15.94	15.90	3.52	1.19	0.40
4	0.45	1.81	10.31	0.62	5.29	92.63	134.31	157.53
5	305.37	93.88	127.87	289.68	162.15	342.99	420.39	470.99
6	38.77	13.62	9.12	32.34	37.18	98.27	98.71	96.26
7	67.29	31.43	50.28	71.64	115.48	220.30	220.44	247.73
8	37.46	54.98	33.40	77.34	137.54	325.64	477.81	604.50
9	0.55	0.13	21.84	1.93	5.38	96.73	139.87	139.29
10	281.99	171.41	172.13	38.73	100.16	419.74	565.91	659.92
11	128.34	152.23	94.93	26.62	52.86	236.56	267.41	313.24
13								
14	31.55	42.97	52.45	69.13	114.72	189.71	253.59	298.63
15	22.59	55.63	39.12	37.65	115.66	206.10	314.99	369.04
20	15.07	31.97	17.03	47.85	70.09	128.08	163.98	201.96
21	29.88	16.39	14.47	18.56	16.81	60.60	64.24	54.81

Classe 1: Peupliers faux-trembles, hauteur: 1, densité: 5, naturel Résolution spatiale optimale: 950 cm

Tableau 24 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 2.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	5.01	2.05	1.53	10.20	4.70	3.95	3.12	3.29
3	2.20	5.56	6.03	2.80	2.88	0.15	0.43	0.70
4	14.90	76.95	26.62	62.38	1.50	3.94	5.04	5.40
5	170.52	317.56	93.12	224.22	119.11	29.07	27.19	28.02
6	21.54	10.34	4.89	14.28	18.94	13.53	12.65	12.32
7	24.78	36.79	21.52	25.11	62.52	19.52	19.06	20.75
8	8.90	98.21	11.14	25.57	87.50	25.47	29.12	34.10
9	8.42	2.23	68.61	55.71	0.16	6.45	8.03	8.02
10	139.17	1003.58	125.97	11.17	62.28	37.14	40.14	46.02
11	65.95	700.56	59.07	10.56	32.17	35.71	37.45	43.40
13	99.71	297.59	90.45	36.14	63.02	19.88	18.22	16.58
14	19.55	118.66	34.59	39.37	86.72	21.22	21.51	22.98
15	9.11	149.28	14.18	13.45	65.86	21.48	22.63	23.29
20	9.94	28.31	10.39	21.07	34.35	26.75	28.15	30.35
21	2.57	2.03	1.52	2.24	3.70	5.56	5.75	6.08

Classe 2: Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 3, naturel Résolution spatiale optimale: 350 cm
Tableau 25 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 3.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	4.53	6.54	8.89	15.88	16.88	2.42	0.51	0.08
2								
4	6.69	21.14	28.19	23.15	9.77	36.56	59.99	52.42
5	22.56	32.37	30.98	59.61	274.12	192.32	218.80	172.54
6	3.17	1.56	0.15	4.39	15.01	59.78	67.63	60.61
7	3.50	4.96	4.77	9.42	146.75	116.56	125.26	113.22
8	1.36	14.52	4.25	10.57	208.90	180.48	250.17	219.97
9	5.79	3.80	43.85	25.92	9.46	42.14	70.75	57.70
10	23.83	81.28	58.12	4.00	87.73	242.05	306.16	256.94
11	19.42	68.51	32.27	4.69	27.78	153.14	181.50	178.25
13								
14	2.70	9.43	8.87	12.39	124.82	109.49	149.26	134.28
15								
20	3.42	11.09	4.25	14.76	53.47	103.10	140.82	148.61
21	1.39	0.73	0.27	0.60	2.08	26.04	32.94	27.37

Classe 3: Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 1150 cm

Tableau 26 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 4.

Classe 4: Pins gris, hauteur: 1, densité: 4, plantation	n
Résolution spatiale optimale: 450 cm	

4	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande I
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	1.31	2.10	13.40	1.05	3.81	89.57	120.92	134.69
2	11.00	53.11	23.35	38.56	0.46	4.54	5.65	6.08
3	8.26	27.33	36.24	29.22	8.96	13.14	24.27	25.52
5	466.80	687.66	126.61	689.02	681.65	108.40	113.02	107.34
6	62.16	40.03	35.37	55.91	34.62	12.57	8.99	7.53
7	93.69	133.88	72.79	115.72	267.00	44.87	34.28	36.31
8	44.26	275.63	54.67	124.29	477.07	121.70	194.10	253.25
9	0.12	3.19	2.01	0.78	0.27	1.69	2.60	1.90
10	398.09	1738.51	154.44	60.26	251.98	237.45	352.64	441.77
11	151.52	1356.34	108.59	38.71	55.80	81.73	87.26	110.14
13	224.80	619.20	131.70	115.85	182.49	44.83	35.08	23.69
14	49.27	261.36	79.76	117.28	287.18	42.85	47.64	51.55
15	30.16	614.50	61.46	53.85	273.22	53.61	72.86	73.77
20	16.80	57.90	34.54	48.91	46.04	24.88	27.73	31.16
21	15.55	22.30	29.49	30.10	10.09	1.16	0.51	0.55

Tableau 27 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 5.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	291.09	98.34	124.48	301.01	173.96	315.34	395.28	449.80
2								
3	22.34	32.27	32.19	60.18	254.48	181.02	214.77	170.62
4	256.89	471.95	98.86	324.53	433.67	265.10	296.53	273.88
6	19.39	10.85	14.51	10.78	7.37	4.52	4.04	4.00
7	61.50	26.08	198.28	29.70	36.41	13.96	5.24	2.77
8	65.00	22.57	22.33	30.09	6.44	1.30	13.04	42.54
9	95.23	53.49	140.25	280.72	389.55	146.90	145.16	110.94
10	0.50	116.90	48.67	21.62	11.47	38.01	81.74	94.62
11	0.03	67.99	2.26	5.45	0.88	9.79	15.13	22.23
13								
14	15.94	25.76	16.32	9.84	3.79	5.52	3.66	1.95
15	11.84	28.56	10.81	6.27	1.21	2.27	0.37	0.06
20	2.32	0.38	1.19	0.62	0.12	2.56	5.36	8.62
21	53.49	76.07	38.13	25.65	22.10	33.03	30.74	23.08

Classe 5:	Pins gris,	, hauteur: 2,	densité 4,	plantation
Récolutio	n cnatiale	ontimale 1	050 cm	

Tableau 28 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 6.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	43.06	11.44	8.81	30.56	31.56	97.28	92.33	83.74
2	24.55	11.36	5.58	14.58	19.76	13.72	12.92	12.73
3	2.20	0.92	0.05	3.53	9.17	29.38	36.26	34.28
4	62.16	40.03	35.37	55.91	34.62	12.57	8.99	7.53
5	22.85	11.97	17.39	12.29	7.78	5.38	4.81	4.37
7	0.00	0.46	1.74	0.09	1.99	0.67	0.94	1.45
8	1.66	2.56	0.93	0.03	4.23	3.63	7.69	10.67
9	39.64	11.55	67.72	59.21	24.56	6.06	3.25	2.62
10	22.48	41.25	31.44	0.18	1.59	15.71	20.95	23.37
11	12.48	33.11	16.59	0.06	1.64	13.62	16.30	19.68
13	14.38	25.37	24.64	1.04	2.24	1.00	0.78	0.30
14	0.00	1.60	4.01	0.94	3.98	1.26	1.90	2.41
15	0.01	3.51	2.58	0.29	4.51	1.62	2.82	3.03
20	0.29	3.38	1.90	2.15	3.66	5.35	6.87	8.03
21	1.31	0.72	0.18	2.46	3.54	4.35	3.88	2.70

Classe 6: Pins gris, hauteur: 1, densité 3, plantation Résolution spatiale optimale: 450 cm

Tableau 29 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 7.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande I
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	67.29	31.44	50.28	71.64	115.48	220.30	220.44	248.00
2								
3	3.40	5.10	4.89	9.25	117.30	103.66	119.15	108.74
4	68.53	110.43	58.55	86.71	260.72	75.14	50.95	55.39
5	62.97	26.79	218.55	29.44	35.36	13.68	5.15	2.68
6	0.03	0.29	1.40	0.04	1.58	0.20	0.45	0.97
8	1.74	3.59	0.05	0.00	7.59	8.68	13.57	18.43
9	34.24	18.69	92.25	87.61	201.85	42.83	27.66	28.88
10	58.77	111.09	265.65	0.51	0.00	52.73	43.22	44.18
11	22.57	87.17	38.15	0.02	0.19	22.02	21.42	24.66
13								
14	0.00	0.88	3.81	0.81	2.12	0.18	0.23	0.17
15	0.01	3.35	1.23	0.12	3.11	0.89	1.84	1.21
20	0.42	3.35	0.90	2.85	2.85	7.26	8.91	10.36
21	1.39	4.21	3.44	2.94	11.30	13.65	13.20	12.19

Classe 7:	Pins gris,	hauteur: 2	, densité 3,	plantation
Résolutio	n spatiale	optimale:	950 cm	

Tableau 30 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 8.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	35.24	61.37	34.24	77.40	157.23	263.87	403.16	522.48
2								
3	1.36	14.52	4.25	10.57	208.90	180.48	250.17	219.97
4	41.58	276.33	52.83	93.13	325.52	228.66	397.85	487.95
5	62.31	23.39	21.36	27.79	5.27	0.95	15.70	52.01
6	1.20	2.84	1.48	0.10	4.54	3.43	8.37	12.92
7	1.64	4.07	0.12	0.03	9.64	9.11	14.32	19.77
9	22.62	31.84	77.27	91.99	343.69	137.22	234.33	242.83
10	64.50	208.91	57.92	0.66	3.46	42.28	36.69	26.20
11	31.82	147.66	21.48	0.00	0.15	11.42	8.05	7.58
13								
14	0.80	1.59	1.16	0.58	0.26	3.55	14.07	25.23
15								
20	1.62	0.91	0.70	2.98	0.99	3.74	2.43	1.69
21	0.00	31.31	3.12	3.22	16.53	27.81	39.23	38.04

Classe 8: Pins gris, hauteur: 2, densité: 2, plantation Résolution snatiale optimale: 1150 cm

Tableau 31 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 9.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	0.95	0.06	37.62	1.78	3.94	65.96	81.35	65.54
2	8.93	3.86	81.98	52.91	0.31	5.24	6.83	6.53
3	13.91	9.60	133.41	54.50	3.97	18.06	29.19	25.50
4	0.05	6.51	1.31	0.00	2.11	2.21	2.78	2.01
5	151.24	94.46	377.92	598.63	173.16	30.06	26.72	22.53
6	39.61	12.65	75.99	62.51	22.26	3.73	2.08	1.67
7	34.34	25.64	138.65	78.76	63.52	9.26	7.57	7.59
8	20.72	44.84	99.50	97.78	111.21	19.98	27.78	28.99
10	118.79	177.49	413.28	52.80	70.71	42.79	55.98	58.23
11	76.61	162.32	222.89	40.92	36.79	30.10	33.14	39.43
13	112.32	118.61	346.07	132.03	85.70	10.83	7.24	4.26
14	44.05	40.05	281.80	172.12	115.92	11.80	9.59	7.66
15	13.48	38.24	56.22	33.27	45.70	8.50	8.19	7.18
20	27.38	37.65	80.28	72.48	50.23	23.80	23.25	24.27
21	9.21	3.66	50.34	33.95	4.61	0.02	0.38	0.13

Classe 9: Pins gris, hauteur: 1, densité: 1, plantation Résolution spatiale optimale: 250 cm

Tableau 32 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 10.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	245.77	98.24	105.65	27.01	64.35	440.03	549.66	554.95
2	139.17	1003.58	125.98	11.17	62.28	37.14	40.14	46.03
3	19.32	69.64	50.03	2.10	36.92	93.35	137.52	140.46
4	450.35	1754.90	164.49	64.07	227.08	178.73	268.40	341.23
5	0.09	74.73	14.83	21.28	11.34	6.48	21.81	26.87
6	18.20	37.60	27.15	0.30	1.20	13.16	17.34	18.64
7	25.25	78.81	51.85	0.75	0.15	19.99	21.50	20.76
8	36.59	116.94	26.88	0.47	2.08	33.13	33.79	23.20
9	154.12	143.06	387.00	63.93	93.84	80.04	93.71	87.99
11	0.03	2.95	0.55	0.54	0.35	1.02	0.66	0.81
13	0.37	6.36	0.09	2.50	0.22	24.05	35.76	41.48
14	18.52	225.78	53.07	2.48	2.05	16.90	26.00	25.50
15	6.63	124.99	9.24	1.12	2.62	6.16	9.77	10.79
20	1.23	6.88	2.39	4.42	2.66	0.34	0.10	0.03
21	15.37	41.72	30.53	1.93	14.98	46.97	66.70	61.82

Classe 10: Pins gris, hauteur: 2, densité: 3, naturel Résolution spatiale optimale: 350 cm

66

Tableau 33 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 11.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	114.56	98.62	67.06	24.15	46.16	232.30	255.29	292.97
2	82.81	641.20	72.46	11.24	33.83	36.21	37.50	42.78
3	13.92	53.76	21.98	3.46	19.60	76.09	100.34	107.22
4	151.52	1356.34	108.59	38.71	55.80	81.73	87.26	110.14
5	0.00	45.05	0.87	5.85	0.97	6.34	10.48	15.58
6	12.48	33.11	16.59	0.06	1.64	13.62	16.30	19.68
7	16.58	70.49	20.35	0.00	0.08	15.04	15.30	17.40
8	24.44	79.37	13.11	0.01	0.08	10.73	7.95	7.76
9	92.25	113.62	197.53	41.87	41.08	54.20	52.88	59.06
10	0.02	6.27	1.63	0.38	0.19	0.82	0.46	0.57
13	0.07	1.02	0.73	0.35	0.02	12.66	16.82	24.22
14	9.80	98.48	10.30	0.29	0.09	10.76	12.99	16.05
15	8.07	190.14	7.02	0.06	0.19	11.08	12.97	17.07
20	1.62	5.90	1.61	1.26	0.65	0.07	0.16	0.29
21	13.76	41.27	19.62	2.56	9.72	37.95	44.59	45.23

Classe 11: Pins gris, hauteur: 2, densité: 2, naturel Résolution spatiale ontimale: 450 cm

Tableau 34 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 13.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	161.60	63.00	82.49	51.68	59.22	197.00	180.59	124.72
2	77.75	203.23	80.78	29.35	46.51	16.86	15.97	14.01
3	23.18	43.66	42.66	13.21	44.38	54.87	64.39	49.46
4	345.41	482.14	149.10	168.37	189.53	37.44	29.15	17.86
5	2.00	7.09	2.71	11.93	8.92	9.26	8.19	8.11
6	9.10	17.77	16.84	0.50	1.33	0.29	0.18	0.01
7	10.56	28.28	18.79	0.43	0.00	0.04	0.28	1.12
8	25.23	42.56	18.72	1.30	0.38	1.86	8.07	12.20
9	112.32	118.61	346.07	132.03	85.70	10.83	7.24	4.26
10	0.24	5.85	4.08	2.47	0.28	21.33	33.58	38.46
11	1.08	4.29	0.08	0.03	0.42	12.80	17.10	24.44
14	18.53	57.22	37.62	0.00	0.48	0.16	0.46	1.05
15	2.22	10.14	3.01	0.00	1.17	0.71	1.35	1.81
20	0.05	0.82	0.50	2.80	4.37	10.08	11.54	14.06
21	11.37	22.81	22.75	10.16	16.03	9.62	9.29	4.78

Classe 13: Pins rouges, hauteur: 2, densité: 2, plantation Résolution spatiale optimale: 250 cm

Tableau 35 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 14.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	41.81	27.47	37.99	56.48	79.66	205.47	226.52	205.04
2	19.55	118.66	34.59	39.37	86.72	21.22	21.51	22.98
3	2.14	6.09	6.28	10.86	55.65	51.12	70.43	68.41
4	65.37	356.58	90.19	159.05	382.01	43.94	46.78	45.50
5	21.95	33.72	23.40	12.00	4.40	3.59	1.99	0.91
6	0.01	1.11	3.18	0.76	3.51	1.12	1.56	1.76
7	0.00	0.39	1.07	0.58	0.80	0.17	0.16	0.07
8	1.69	0.63	1.26	1.08	0.00	0.74	3.82	5.42
9	41.18	37.47	215.86	147.31	134.24	19.64	17.21	15.47
10	18.52	225.78	53.07	2.48	2.05	16.90	26.00	25.50
11	11.50	151.95	12.76	0.17	0.01	10.26	12.40	14.98
13	12.85	60.69	27.28	0.00	0.64	0.18	0.75	2.04
15	0.00	3.81	0.02	0.00	0.41	0.19	0.34	0.19
20	0.70	2.66	0.35	1.26	1.17	4.43	4.98	5.15
21	1.45	4.74	6.07	9.54	22.46	13.97	17.02	14.32

Classe 14: Pins rouges, hauteur: 3, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 350 cm

Tableau 36 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 15.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	23.01	41.42	31.78	36.15	94.86	246.93	352.27	405.99
2	13.29	122.43	30.40	17.68	81.53	21.19	22.86	24.45
3	1.57	10.07	4.66	5.74	65.99	66.80	99.22	91.70
4	27.49	301.44	56.62	50.37	261.16	74.21	136.64	169.72
5	15.10	25.08	12.19	8.00	3.20	5.63	2.72	1.52
6	0.09	2.43	2.52	0.18	3.78	1.00	2.29	2.79
7	0.10	2.06	0.50	0.04	1.69	0.24	0.69	0.30
8	0.37	0.13	0.27	0.06	0.06	3.15	14.79	29.03
9	21.52	34.76	99.80	55.35	141.92	37.64	45.85	39.28
10	16.20	198.88	33.10	0.62	1.54	38.44	80.27	94.09
11	10.76	130.67	11.05	0.00	0.06	16.59	18.97	25.30
13								
14	0.15	0.19	0.32	0.24	0.01	0.00	0.04	8.16
20	0.36	0.87	0.14	1.16	0.53	3.44	4.11	5.27
21	0.37	8.44	3.67	2.81	15.72	15.15	20.97	16.35

Classe 15: Pins rouges, hauteur: 3, densité: 1, naturel Résolution spatiale optimale: 650 cm

Tableau 37 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'été dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 20.

	Bande 4	Bande 8	Bande 2	Bande 7	Bande 6	Bande 5	Bande 3	Bande 1
Classe	480 nm	548 nm	675 nm	698 nm	710 nm	734 nm	746 nm	776 nm
1	16.04	32.70	17.38	50.25	84.02	133.82	179.04	229.09
2								
3	3.40	10.87	4.04	14.53	55.54	106.70	143.02	149.45
4	19.94	64.70	37.34	61.67	85.85	58.80	74.04	96.90
5	2.23	0.33	1.05	0.55	0.19	3.27	6.84	11.35
6	0.42	3.70	2.47	2.77	5.41	7.78	10.77	13.81
7	0.58	3.59	1.10	3.42	4.04	10.09	12.07	14.23
8	1.64	0.85	0.65	2.88	0.96	3.87	2.45	1.63
9	17.13	23.26	50.75	64.07	88.28	48.86	60.10	78.67
10	2.78	11.69	5.78	4.38	3.23	0.00	0.10	0.33
11								
13								
14	0.46	2.09	0.11	1.15	1.38	7.51	10.65	13.86
15								
21								

Classe 20: Pins - Peupliers (mixte à tendance résineuse), hauteur: 4, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 1250 cm

Tableau 38 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 4.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	0.02	2.80	2.35	0.09	22.27
2	0.01	1.64	1.00	0.73	1.87
5	67.81	76.48	68.54	81.91	7.99
6	19.39	12.54	10.94	17.26	8.70
7	49.45	58.59	53.92	70.95	1.19
8	52.62	49.02	37.97	61.08	14.72
9	0.10	7.56	0.01	0.53	0.00
10	68.80	84.59	86.06	91.27	34.43
11	20.02	22.71	17.55	28.63	8.36
13	55.89	34.27	48.19	78.59	13.70
14	36.43	37.31	33.63	63.38	5.73

Classe 4: Pins gris, hauteur: 1, densité 4, plantation Résolution spatiale optimale: 375 cm

Tableau 39 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 5.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	14.30	6.27	5.69	15.65	16.79
2	10.16	10.72	10.26	8.29	2.34
4	81.86	93.93	101.36	95.71	13.63
6	19.83	14.39	23.99	15.67	1.61
7	24.53	14.14	17.23	20.94	0.75
8	3.52	0.30	1.08	1.02	10.02
9	116.74	102.80	115.05	102.80	2.29
10	5.96	16.08	15.90	10.11	34.98
11	0.90	0.46	0.59	1.06	11.47
13	4.80	0.00	2.26	0.00	22.39
14	15.16	3.75	6.12	15.04	5.33

Classe 5: Pins gris, hauteur: 2, densité 4, plantation Résolution spatiale optimale: 1125 cm

Tableau 40 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 6.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	5.66	0.73	0.39	4.67	19.34
2	4.32	1.32	0.98	1.87	7.46
4	24.39	19.36	19.14	21.02	0.78
5	16.71	13.64	23.91	13.86	1.72
7	5.83	5.51	9.87	8.53	0.01
8	12.95	12.38	20.12	13.30	11.12
9	30.55	16.26	16.82	26.44	0.02
10	25.20	26.05	41.68	21.68	30.90
11	5.57	6.63	7.87	10.85	4.90
13	14.40	14.45	18.31	15.31	12.86
14	1.02	4.50	4.66	6.01	2.41

Classe 6: Pins gris, hauteur: 1, densité: 3, plantation Résolution spatiale optimale: 1575 cm

Tableau 41 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 7.

••••••••••••••••	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	8.14	2.81	2.36	9.57	23.36
2	5.97	3.43	3.34	4.81	10.99
4	37.95	46.80	49.19	56.67	0.28
5	9.07	12.50	15.73	5.61	6.15
6	1.29	1.83	3.73	3.52	0.72
8	8.19	13.34	16.18	9.52	26.59
9	54.20	65.25	69.74	84.93	0.30
10	27.09	47.63	55.36	30.26	58.03
11	4.02	4.53	4.57	6.09	5.37
13	11.99	21.62	16.36	13.49	11.67
14	0.86	0.00	0.13	0.36	0.84

Classe 7: Pins gris, hauteur: 2, densité: 3, plantation Résolution spatiale optimale: 2475 cm

Tableau 42 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 8.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	12.64	6.65	5.72	14.22	8.87
2	9.59	8.75	8.34	8.03	0.73
4	67.30	84.11	90.31	87.31	117.19
5	0.69	0.04	0.50	0.03	23.57
6	11.64	11.80	19.79	12.51	12.03
7	7.64	11.67	14.36	8.58	20.37
9	106.16	132.11	149.26	115.88	17.60
10	11.01	13.58	20.69	12.19	24.14
11	1.56	1.60	1.62	1.47	2.08
13	0.22	0.89	0.03	0.97	125.97
14	7.39	3.52	4.91	7.09	19.66

Classe 8: Pins gris, hauteur: 2, densité: 2, plantation Résolution spatiale optimale: 1875 cm

Tableau 43 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 9.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	0.00	1.42	1.37	0.33	21.68
2	0.01	1.01	0.88	1.48	8.97
4	0.04	1.10	0.93	0.10	0.67
5	117.42	133.41	147.75	110.05	2.98
6	30.55	16.26	16.82	25.74	0.02
7	86.25	94.29	100.08	94.86	0.00
8	106.81	118.42	129.89	115.88	16.49
10	137.24	176.41	196.34	140.95	40.77
11	24.17	21.38	21.92	63.68	5.17
13	113.53	122.83	123.74	122.88	14.18
14	47.61	61.33	47.58	73.50	2.30

Classe 9: Pins gris, hauteur: 1, densité: 1, plantation Résolution spatiale optimale: 1575 cm

Tableau 44 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 10.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	15.82	10.21	9.12	17.86	1.60
2	11.44	13.92	13.36	9.90	1.82
4	90.16	120.78	131.57	109.35	95.55
5	7.05	18.47	19.05	10.79	48.05
6	25.60	26.13	41.47	21.88	28.95
7	41.84	57.67	69.77	54.20	31.65
8	11.04	12.34	17.45	11.41	15.81
9	135.51	162.56	181.11	126.20	37.44
11	0.59	0.37	0.32	9.16	0.54
13	15.13	6.74	21.37	6.78	93.41
14	20.74	16.54	18.31	30.95	31.01

Classe 10: Pins gris, hauteur: 2, densité: 3, naturel Résolution spatiale optimale: 1425 cm

Tableau 45 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 11.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	7.80	2.57	2.23	9.09	4.92
2	6.23	6.12	5.57	5.02	0.47
4	20.10	22.95	21.54	29.66	24.64
5	1.03	0.67	0.76	1.26	6.78
6	1.21	2.29	3.12	2.39	9.29
7	0.04	0.00	0.00	0.24	6.20
8	0.30	0.19	0.13	0.53	1.59
9	22.18	18.94	18.71	33.62	10.68
10	1.69	2.50	2.59	2.62	2.15
13	0.36	0.31	0.07	1.06	28.90
14	0.22	0.02	0.15	0.03	15.42

Classe 11: Pins gris, hauteur: 2, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 825 cm

Tableau 46 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 13.

	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 8	Bande 7
Classe	489 nm	555 nm	573 nm	653 nm	846 nm
1	13.38	8.26	5.96	15.06	49.66
2	10.16	10.40	8.39	8.76	36.62
4	69.57	90.95	89.17	89.95	24.87
5	0.13	0.81	0.38	0.28	72.73
6	12.09	14.63	19.02	13.32	18.34
7	12.23	21.78	16.32	13.72	12.98
8	0.21	1.24	0.00	0.63	197.89
9	119.43	163.92	168.03	135.78	14.94
10	11.35	6.69	22.03	6.03	184.82
11	1.48	1.17	1.68	1.11	9.26
14	8.19	6.55	5.28	8.55	1.84

Classe 13: Pins rouges, hauteur: 2, densité 2, plantation Résolution spatiale optimale: 2325 cm

Tableau 47 Valeurs obtenues à partir du test de variance bivariée appliqué aux images d'automne dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette pour la classe forestière 14.

Classe	Bande 6 489 nm	Bande 4 555 nm	Bande 5 573 nm	Bande 8 653 nm	Bande 7 846 nm
2	6.12	9.26	5.94	6.71	5.83
4	39.23	48.03	42.11	65.96	5.64
5	50.13	16.48	19.96	15.96	14.60
6	1.03	2.69	3.13	5.86	3.19
7	8.24	2.79	4.62	2.51	6.43
8	13.84	2.47	3.17	1.55	19.75
9	37.98	27.78	26.60	55.17	2.08
10	35.32	22.01	30.32	25.11	36.77
11	0.27	0.05	0.18	0.07	19.45
13	18.18	2.41	4.35	10.11	0.71

Classe 14: Pins rouges, hauteur: 3, densité: 2, naturel Résolution spatiale optimale: 525 cm

Profil de la séparabilité spectrale des classes en fonction de la résolution spatiale

Afin d'illustrer l'importance de la résolution spatiale optimale pour assurer la séparabilité spectrale maximale des classes, le profil de la séparabilité spectrale en fonction de la résolution spatiale a été établi pour deux paires de classes forestières jugées représentatives. Les exemples choisis proviennent des images d'été résultant de l'application du filtre simulant la FTM du capteur.

La première paire comprend les classes forestières 14 et 20. Il s'agit d'une classe de pins rouges naturels et de la classe de forêt mixte à tendance résineuse. A leur résolution spatiale optimale respective, soit 350 cm et 1250 cm, ces classes se discriminent dans les trois bandes du proche-IR, centrées à 734 nm, 746 nm et 776 nm. Le profil de leur séparabilité spectrale en fonction de la résolution spatiale révèle deux crêtes de séparabilité (Fig. 32). La première se trouve aux fines résolutions spatiales s'étendant de 150 à 350 cm avec un mode situé à 150 cm, alors que la deuxième s'étale de 950 cm à 2250 cm avec un mode situé à 1350 cm. Ce profil démontre qu'il est possible d'obtenir une discrimination des classes à des résolutions autres que celles définies comme optimales, mais que la séparabilité est maximale aux résolutions très voisines des résolutions optimales. Il indique de plus que les classes ne sont pas discriminables aux résolutions comprises entre 450 cm et 750 cm dans toutes les bandes spectrales considérées pour l'étude.

Le second exemple concerne les classes forestières 4 et 5. Il s'agit de deux plantations de pins gris de densité élevée semblable et de hauteur différente. Leur résolution spatiale optimale est de 450 cm et 1050 cm, respectivement. Le graphique de la variance intra-classe en fonction de la résolution spatiale indique un comportement quasi-linéaire de la variance sur la presque totalité de la gamme de résolutions considérées, ce qui pourrait être interprété comme une illustration du rôle secondaire de la résolution spatiale optimale (Fig. 14 et 15). Cette observation est toutefois contredite par le test de variance bivariée qui exprime une forte séparabilité spectrale entre les deux classes, à ces résolutions optimales, dans toutes les bandes spectrales (Tabl. 26 et 27). L'interprétation du profil de séparabilité spectrale révèle que les classes sont discriminables à toutes les résolutions comprises entre 250 cm et 550 cm de même qu'aux résolutions comprises entre 1050 cm et 1250 cm (Fig. 33).



Figure 32 Profil de la séparabilité spectrale des images d'été, dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette, en fonction de la résolution spatiale pour les classes forestières 14 et 20 (légende à la figure 10).



Figure 33 Profil de la séparabilité spectrale des images d'été, dégradées à l'aide du filtre simulant la FTM d'un capteur à barrette, en fonction de la résolution spatiale pour les classes forestières 4 et 5 (légende à la figure 10).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de cette étude consistait à développer une méthode pour identifier les résolutions spatiales optimales à la détection et la discrimination de couverts forestiers à partir de données de télédétection. L'étude repose sur l'hypothèse selon laquelle le contenu en information d'un pixel dépend étroitement de l'agrégation spatiale des éléments au sol compris à l'intérieur de la surface délimitée par la résolution spatiale du capteur. En conséquence, il existe une résolution spatiale dite optimale, correspondant au niveau d'agrégation caractéristique de chaque objet géographique d'intérêt, qui maximise les chances de détection et de discrimination de cet objet. En terme spectral, cette situation d'équilibre se traduit par une faible variance interne de la classe ainsi formée.

L'intérêt d'un tel projet est de deux ordres. D'abord, il offre la possibilité d'identifier de façon quantitative la gamme de résolutions spatiales dans laquelle devrait opérer un capteur conçu pour l'étude du milieu forestier. Ensuite, il permet d'associer le contenu en information d'une image de télédétection avec des propriétés spatiales intrinsèques des objets géographiques souvent négligées lors de l'acquisition et de l'interprétation de ces images.

Deux séries d'images, provenant du capteur aéroporté MEIS-II et acquises audessus d'une portion de la forêt expérimentale de Petawawa, ont été utilisées pour l'étude. La première série a été acquise le 29 août 1986, à 50 cm de résolution spatiale, dans huit bandes spectrales étroites s'étendant du bleu au proche-IR. L'acquisition du deuxième groupe de données a été réalisée le 29 octobre 1985, à 75 cm de résolution spatiale, dans cinq bandes spectrales plus larges couvrant la portion du visible et du proche-IR.

A la suite de mesures effectuées sur le terrain, des sites représentatifs de 21 classes forestières, caractérisées par l'espèce, la hauteur, la densité et l'organisation des peuplements, ont été sélectionnés sur les images. A partir du centre de chacun des sites, la résolution spatiale originale des images a été dégradée, selon un incrément de 1 m, jusqu'à environ 30 m. La variance spectrale interne de chaque classe forestière a ensuite été calculée pour chacune des résolutions spatiales et des bandes spectrales. La résolution spatiale correspondant à la variance interne la plus faible de la classe forestière, pour l'ensemble des bandes spectrales, a été identifiée comme optimale.

Afin de vérifier la solidité du concept de résolution spatiale, cette méthode a été reproduite dans trois différentes conditions d'acquisition de données. La première a consisté à appliquer sur les images d'été un filtre moyen de ré-échantillonnage spatial, simulant une FTM idéale du capteur. Lors de la seconde étape de l'étude, un filtre simulant la FTM théorique d'un capteur à barrette a été développé et appliqué sur les images d'été pour la dégradation de la résolution spatiale. Finalement, ce filtre a été utilisé sur les images d'automne pour évaluer l'impact du temps d'acquisition des données sur les résultats.

De plus, des analyses de variance bivariées ont été réalisées sur chaque paire de classes forestières comportant un même nombre de sites représentatifs, dans les trois conditions d'acquisition de données, afin de mesurer leur séparabilité spectrale à leur résolution spatiale précédemment définie comme optimale. Finalement, le profil de séparabilité spectrale, exprimé par la valeur F du test de variance, de deux paires de classes forestières jugées représentatives a été établi en fonction de la gamme de résolutions spatiales générées pour l'étude. Cette étape avait pour but d'illustrer l'importance de la résolution spatiale optimale pour maximiser le potentiel de discrimination des classes.

Identification de la résolution spatiale optimale dans les trois conditions d'acquisition de données

L'analyse des résultats obtenus lors de l'identification de la résolution spatiale optimale dans les trois conditions d'acquisition de données a permis de faire ressortir les constatations suivantes:

1) Lorsque le filtre moyen de ré-échantillonnage spatial est utilisé sur les images d'été, la résolution spatiale optimale se situe, pour la majorité des classes, entre 5 m et 20 m et intègre dans des proportions variables des couronnes d'arbres, de l'ombrage et du sousbois. Dans ce cas, ce sont les caractéristiques spatiales (hauteur, densité et organisation des peuplements) qui déterminent le plus la résolution spatiale optimale. Dans le cas des peuplements naturels, la résolution spatiale optimale tend à être plus grossière au fur et à mesure que la densité du peuplement diminue. Cette relation s'explique par le fait qu'à une densité faible, un pixel doit correspondre à une plus grande surface sur le terrain avant d'intégrer la proportion appropriée de couronne, d'ombrage et de sous-bois qui minimise la variance spectrale de la classe. Dans le cas des plantations, c'est la hauteur des arbres qui joue un rôle prépondérant, la résolution spatiale optimale optimale s'avérant plus

fine lorsque la hauteur des arbres est faible. En effet, la croissance des arbres se trouve perturbée lorsque leur espacement est restreint, ce qui se traduit par une variance spectrale élevée jusqu'à des résolutions assez grossières.

2) Lorsque comparée au filtre moyen de ré-échantillonnage spatial, l'utilisation d'un filtre simulant la FTM théorique d'un capteur à barrette a pour effet de lisser le profil des courbes de variance et de déplacer la résolution spatiale optimale vers des résolutions plus fines. Le déplacement moyen de la résolution est de l'ordre de 5 m. Ce double phénomène s'explique par le fait que le pixel résultant de la dégradation spatiale intègre à la fois le contenu en information des pixels agrégés définissant une surface au sol équivalente et une proportion de l'information de pixels avoisinants due à l'effet de la FTM. Le filtre agit comme un filtre passe-bas et atténue les hautes fréquences de l'image résultante. Un calcul rapide a permis d'évaluer, qu'à la résolution spatiale optimale, la superficie au sol délimitée par les pixels qui sont considérés lors de l'application du filtre simulant la FTM du capteur correspond approximativement à la superficie couverte par les pixels agrégés à l'aide du filtre moyen. Cette observation confirme la relation étroite entre le contenu en information des pixels et un niveau d'agrégation d'éléments au sol propre à un objet géographique donné.

3) Le profil typique des courbes de variance interne obtenues à la suite de l'application du filtre simulant la FTM du capteur sur les images d'automne se caractérise par une baisse rapide de la variance jusqu'à la résolution d'environ 10 m, suivie d'une séquence quasilinéaire de valeurs faibles jusqu'aux résolutions les plus grossières. Dans le cas de classes de feuillus, il n'a pas été possible de déterminer une résolution spatiale optimale. Ce comportement s'explique par la réduction de l'activité phénologique et l'homogénéisation du fond de scène à ce temps particulier de l'année. Pour plusieurs classes de conifères, lorsque comparée aux résultats précédents, la résolution spatiale optimale est déplacée vers des résolutions plus grossières. Ce déplacement est de l'ordre d'environ 10 m. Toutefois, il n'est pas possible d'établir une relation stable entre la résolution spatiale optimale et des caractéristiques des peuplements. Le contenu en information des pixels reflète plutôt l'adaptation différentielle des arbres à différentes conditions de stress.

Séparabilité spectrale des classes forestières à leur résolution spatiale optimale

L'interprétation des résultats d'analyses de variance bivariées, pour les trois conditions d'acquisition de données, a mis en évidence les faits suivants:

1) Toutes les classes sont significativement différentes dans au moins deux bandes spectrales, à l'exception de 10 paires. La variable commune à ces paires de classes est l'espèce. La confusion spectrale apparaît principalement entre des classes de peupliers faux-trembles, de pins gris et de pins rouges. Ces résultats indiquent que, lorsque les peuplements forestiers sont considérés à leur résolution spatiale optimale, la variable la plus importante pour assurer leur discrimination devient alors la propriété physique, c'est-à-dire les différents pigments qui composent les parties d'un arbre et qui caractérisent chaque espèce.

2) Dans le cas où la discrimination se produit dans une bande spectrale seulement, pour les images d'été, ce sont les bandes centrées à 548 nm, 710 nm et 776 nm qui assurent la séparabilité des classes. Ces longueurs d'onde correspondent au pic de réflectance du vert, à la frontière entre le rouge et le proche-IR, indicateur du stress de la végétation, et au plateau de réflectance élevée du proche IR, respectivement. Dans le cas des images d'automne, la longueur d'onde centrale la plus importante lors de la séparabilité des classes dans une bande unique est 846 nm, correspondant au plateau de réflectance élevée du proche-IR, suivie par 653 nm et 555 nm correspondant au maximum d'absorption du rouge et au pic de réflectance du vert, respectivement.

3) Le profil de la séparabilité spectrale en fonction de la résolution spatiale démontre qu'il est possible d'obtenir une discrimination des classes à des résolutions autres que celles définies comme optimales, mais que la séparabilité est maximale aux résolutions optimales ou très voisines des résolutions optimales.

Sur le plan théorique, l'ensemble de cette étude a permis de confirmer la validité du concept de résolution spatiale dans des conditions variables d'acquisition de données et de démontrer son importance lors de la discrimination spectrale des différentes classes forestières considérées. Elle a aussi mis en évidence la nécessité de prendre en considération les propriétés spatiales des objets géographiques d'intérêt lors de l'acquisition et de l'interprétation des données de télédétection. Dans un contexte opérationnel, la méthodologie développée a permis d'identifier la gamme de résolutions spatiales dans laquelle devrait opérer un capteur conçu pour l'étude du milieu forestier. Elle fournit de plus des indications très utiles pour le développement d'algorithmes de classification adaptés à l'environnement forestier intégrant les propriétés spectrales et spatiales des objets à l'étude.

A la lumière des résultats obtenus, nous formulons les recommandations suivantes:

1) La résolution spatiale optimale pour la détection de différents types de couvert forestier dans des conditions idéales d'acquisition (FTM assez élevée, transparence relative de l'atmosphère, visée au nadir, angle zénithal solaire <45°, forte activité phénologique et terrain peu accidenté) devrait être comprise entre 5 m et 20 m. Cependant, il faut noter que toute influence provenant de l'une ou l'autre des conditions d'acquisition entraîne une modification de ces limites. La FTM du capteur et de l'atmosphère a pour conséquence d'atténuer le signal enregistré et de réduire les résolutions appropriées alors que des facteurs liés à la scène (angle zénithal solaire, terrain accidenté et variation spatiale de l'activité phénologique) produisent un changement vers des résolutions plus grossières.

2) En raison de la grande variabilité des conditions probables d'acquisition et de leur influence sur la résolution spatiale optimale pour la détection et la discrimination des couverts forestiers, un capteur de télédétection spécialisé en foresterie devrait posséder la capacité d'acquérir des images à multi-résolutions spatiales. Une procédure d'étalonnage spatial pourrait être développée en utilisant comme cibles les parcelles d'échantillonnage couramment employées pour l'inventaire forestier. Ces parcelles constituent des surfaces représentatives du stock forestier d'une région où l'information sur la distribution spatiale des différents couverts est régulièrement mise à jour. Une procédure de pré-acquisition sur ces cibles privilégiés (à l'aide d'un capteur dépointable, par exemple) permettrait l'étalonnage spatial et l'identification des résolutions spatiales optimales pour la détection des types et de l'état des peuplements forestiers présents dans la région d'analyse.

3) À cause de la complémentarité de l'information spectrale et spatiale pour la détection et la discrimination des classes forestières, un capteur spécialisé devrait pouvoir acquérir des données dans des longueurs d'onde couvrant l'ensemble du profil de réflectance typique de la végétation, selon des largeurs de bandes maximales de 20 à 30 nm afin de minimiser la corrélation spectrale et accroître le potentiel de discrimination. Les centres de bande devraient se trouver dans les régions du spectre suivantes:

• le pic de la réflectance du vert (550 nm),

• la région de transformation des pigments associée à la sénescence des végétaux (635 nm),

• la région de l'absorption chlorophyllienne (670 nm),

• la région de la réflectance croissante du très proche IR (745 nm) et

• le plateau de réflectance élevée du proche IR (800 nm).

5. RÉFÉRENCES

Marceau, D.J., 1992. The Problem of Scale and Spatial Aggregation in Remote Sensing: An Empirical Investigation Using Forestry Data. Thèse de Ph.D., Département de géographie, University of Waterloo, 180 p.

Marceau, D., D. Gratton et J.P. Fortin, 1992. Développement d'une méthode pour identifier les résolutions spatiales optimales à la détection de couverts forestiers (Rapport d'étape). PROGERT DT2202, INRS-Eau rapport scientifique no. 361, 44 p.

Palik, E.D., 1991. Handbook of Opticals Constants of Solids II. Academic Press, 1096 pp.

Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling, 1986. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 818 pp.

Tabachnick, B.G. and L.S. Fidell, 1983. Using Multivariate Statistics. Harper and Row, 509 pp.

Zwick, H., J. N. de Villiers and W. McColl, 1978. Laboratory Evaluation of the Prototype MEIS (Multi-detector Electro-Optical Imaging Scanner). Énergie, Mines et Ressources Canada, Centre Canadien de Télédétection, Rapport de recherche 78-5, 24 p.