INRS

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 Danielle Marceau, Denis Gratton et Jean-Pierre Fortin

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

> > Septembre 1992

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
1. INTRODUCTION	1
1.1 Le concept de résolution spatiale optimale	2
1.2 Objectifs du rapport	4
1.3 Organisation du rapport	5
2. SCHÉMA EXPÉRIMENTAL	6
2.1 Description du site d'étude	6
2.2 Description des données de télédétection	7
2.3 Détermination des classes de couvert forestier	9
2.4 Description de l'algorithme de ré-échantillonnage spatial des	
données	.10
2.5 Description de la méthode d'identification de la résolution spatiale	
optimale pour chacune des classes	.12
3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	.13
4. SUITE PRÉVUE DES TRAVAUX	.38
5. CONCLUSION	.42
6. RÉFÉRENCES	.44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Relation entre la taille d'un objet géographique, la dimension du pixel et la structure de l'image de télédétection
Figure 2 Localisation du site d'étude
Figure 3 Étendue spectrale des bandes MEIS-II illustrées sur la courbe de réflectance standard de la végétation
Figure 4 Représentation schématique de la FTM pour les différentes composantes d'un système d'acquisition de données à barrette
Figure 5 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
Figure 6 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
Figure 7 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
Figure 8 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
Figure 9 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
Figure 10 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
Figure 11 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
Figure 12 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
Figure 13 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

optimale délimité sur un site représentatif
Figure 15 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
Figure 16 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
Figure 17 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
Figure 18 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
Figure 19 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
Figure 20 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
Figure 21 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
Figure 22 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
Figure 23 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
Figure 24 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
Figure 25 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
Figure 26 FTM théoriques d'un capteur à barrette pour une longueur d'onde de 500 nm

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Caractéristiques des bandes spectrales MEIS-II utilisées pour l'étude	8
Tableau 2 Classes forestières déterminées pour l'étude	9
Tableau 3 Classes de hauteur et de densité de tronc	10
Tableau 4 Résolution spatiale optimale identifiée pour chacune des classes forestières	37

1. INTRODUCTION

Au cours des vingt dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de l'acquisition et du traitement d'images numériques de télédétection pour l'étude des phénomènes observables à la surface de la terre. Il est dorénavant possible d'obtenir des données dans une large gamme de bandes spectrales, s'étendant du visible aux micro-ondes, à partir de capteurs imageurs capables d'opérer à des résolutions spatiales de plus en plus fines (de l'ordre de 10 m pour les capteurs satellitaires et de 40 cm pour les capteurs aéroportés). Simultanément, la performance croissante des ordinateurs contribue au développement accéléré de méthodes innovatrices de traitement d'images pour l'extraction d'informations nécessaires à l'inventaire et la gestion des ressources terrestres. 1

Toutefois, en dépit des apports scientifiques substantiels de la télédétection multispectrale depuis son avènement, force est de constater que son potentiel demeure encore peu exploité dans bon nombre d'applications. Ainsi, dans le domaine de l'inventaire forestier, les cartes produites par les méthodes conventionnelles de photointerprétation, couplée à des relevés terrestres et aériens, demeurent les documents de référence. La précision et l'exactitude des cartes obtenues par la classification automatisée d'images de télédétection ne répondent toujours pas aux exigences de la plupart des utilisateurs potentiels.

A la recherche d'une solution à ce problème, des travaux récents ont mis en évidence un aspect théorique fondamental: les modèles d'acquisition et de classification couramment utilisés en télédétection accordent une place prépondérante à la théorie spectrale et négligent de prendre en considération les propriétés spatiales des objets à l'étude en relation avec la résolution spatiale du capteur. Des résultats obtenus lors d'une étude sur un site de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, ont démontré qu'il n'existe pas une résolution spatiale unique adaptée à la détection et la discrimination des différents types de couverts composant une région forestière. La réponse spectrale caractéristique d'un couvert donné est optimale à une résolution spatiale spécifique (Marceau, 1992).

1.1 Le concept de résolution spatiale optimale

Le concept de résolution spatiale optimale origine des considérations suivantes. Une région géographique est habituellement composée d'un mélange de différents types de couvert, considérés comme des objets géographiques, présentant des caractéristiques physiques et spatiales très variables. Dans le cas d'un environnement forestier, selon l'échelle d'observation choisie, ces objets peuvent être les composantes d'un arbre, telles que les feuilles, le tronc et les branches, l'arbre lui-même considéré comme une entité ou un peuplement défini comme homogène à partir de critères tels que l'espèce, l'âge, la hauteur et la densité des arbres qui le composent. La présence et l'arrangement spatial de ces objets sont gouvernés par des lois biologiques, des associations écologiques de même que par diverses interventions anthropiques.

L'acquisition d'une image de télédétection au-dessus d'une région donnée correspond en fait à l'application d'une grille d'échantillonnage, de forme et de dimension fixes, définie par la résolution spatiale du capteur. La mesure correspondant à chaque pixel de l'image est une intégration de la luminance de l'ensemble particulier des objets contenus à l'intérieur de la surface au sol délimitée par la résolution spatiale. Ainsi, la résolution spatiale utilisée définit implicitement une échelle d'observation et un niveau d'agrégation des objets qui déterminent la structure et le contenu en information de l'image.

Trois situations générales sont susceptibles de se produire: la dimension du pixel peut être plus petite, approximativement égale ou plus grande que l'objet d'intérêt au sol. Un point important à noter est que, puisqu'une image représente une grande variété d'objets géographiques, chaque combinaison est possible, et en fait très probable, à l'intérieur d'une même image acquise au-dessus d'une région donnée (Fig. 1).

Lorsque la dimension du pixel est plus petite que la taille d'un objet d'intérêt, l'information contenue dans les pixels correspond à diverses composantes de cet objet. La probabilité que des pixels voisins aient des valeurs de gris différentes est forte, ce qui crée une structure hétérogène de l'image ainsi produite. Cette situation se traduit par une variance spectrale interne élevée de l'objet à discriminer. Au fur et à mesure que la dimension du pixel se rapproche de la taille de l'objet d'intérêt, la valeur de gris des pixels correspond à l'agrégation des éléments au sol qui caractérisent cet objet. L'image présente alors une structure homogène due à la variance réduite des pixels qui représentent l'objet.

Lorsque la dimension du pixel devient plus grande que la taille de l'objet d'intérêt, l'information contenue dans les pixels correspond à l'agrégation de plusieurs éléments au sol qui n'ont plus de correspondance avec l'objet d'intérêt et la structure de l'image redevient hétérogène.

Lors du passage d'un extrême à l'autre, il existe une situation d'équilibre entre la résolution spatiale du capteur et la variance spectrale interne des objets d'intérêt qui offre les meilleures chances de discrimination (Marceau *et al.*, 1992). Cette situation apparaît lorsque la taille du pixel correspond au niveau d'agrégation spatiale caractéristique de l'objet au sol, ce qui se traduit en terme spectral par une faible variance interne de la classe ainsi formée. Il serait dès lors possible d'identifier une résolution spatiale optimale appropriée à chaque objet géographique recherché défini par des propriétés spectrales et spatiales qui lui sont propres.



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

L'insuccès relatif de plusieurs méthodes d'extraction d'information des images de télédétection peut donc s'expliquer par l'inédaquation de l'approche conventionnelle qui consiste à tenter de discriminer des objets présentant des caractéristiques spatiales très différentes à partir d'une résolution spatiale unique. Une avenue de recherche innovatrice émerge d'une telle constatation. Puisque les données de télédétection dépendent de la grille d'échantillonnage utilisée pour leur acquisition, il importe dorénavant de ne plus dissocier les propriétés spectrales des objets au sol de leurs propriétés spatiales et ce, en prenant en considération le facteur déterminant de la résolution spatiale du capteur.

De nouvelles stratégies d'acquisition et de traitement de données de télédétection doivent donc être testées, basées sur une approche à multi-résolutions spatiales. Des études empiriques doivent être menées afin d'établir la relation entre les propriétés spatiales et spectrales d'objets au sol et le contenu d'information d'images de télédétection à différentes résolutions spatiales et, ainsi, de déterminer la gamme de résolutions spatiales qui maximisent le potentiel de détection et de discrimination de ces objets. Ces connaissances pourront s'avérer très utiles pour l'élaboration des spécifications techniques d'un futur capteur. Elles serviront, à plus long terme, à développer une solide théorie spatiale en télédétection, essentielle à la description et la compréhension des objets de nature géographique.

1.2 Objectifs du rapport

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants:

1) déterminer les résolutions spatiales les plus appropriées pour la détection et la discrimination de différentes classes forestières en milieu tempéré à partir de l'éventail des bandes spectrales du capteur MEIS-II;

2) tester deux méthodes de ré-échantillonnage spatial de données de télédétection: la première simulant une fonction de transfert de modulation (FTM) idéale d'un capteur, la seconde intégrant l'effet de la FTM d'un capteur à barrette dérivés d'un modèle théorique;

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 à l'étude.

1.3 Organisation du rapport

Ce rapport présente les résultats des travaux en cours obtenus jusqu'à ce jour. Les résultats finaux feront l'objet d'un rapport subséquent.

Le schéma expérimental de l'étude est décrit dans la deuxième section. Il inclut la localisation du site d'étude et la description des données utilisées, la caractérisation des classes forestières identifiées sur l'image et sur le terrain, une description de l'algorithme de ré-échantillonnage spatial utilisé pour simuler des données à différentes résolutions et, finalement, une description de la méthode d'identification de la résolution spatiale optimale pour chacune des classes.

Les résultats obtenus sont présentés à la section 3. Les étapes ultérieures à compléter dans le cadre du projet de recherche sont décrites à la section 4. Une conclusion, suivie d'une brève liste de références, complètent le rapport.

2. SCHÉMA EXPÉRIMENTAL

Afin de déterminer les résolutions spatiales optimales à la détection et la discrimination de couverts forestiers, des données provenant de huit bandes spectrales du capteur aéroporté MEIS-II, acquises à 50 cm de résolution spatiale au-dessus d'une portion de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, ont été utilisées. Des sites représentatifs de différentes classes forestières ont d'abord été sélectionnés. Les portions d'image correspondant à ces sites ont été ré-échantillonnées jusqu'à 10 m, 15 m, 20 m ou 30 m selon la dimension approximative des sites. La variance des pixels situés au centre des sites composant chaque classe forestière a été calculée pour chacune des résolutions spatiales. La résolution spatiale optimale a été identifiée comme étant celle offrant la plus faible variance spectrale de la classe.

Les données de télédétection ont été gracieusement fournies par le Centre canadien de télédétection, en collaboration avec l'Institut forestier national de Petawawa. La plupart des analyses ont été réalisées sur un VAX 11/780 de l'INRS-Eau.

2.1 Description du site d'étude

Le site d'étude correspond à une portion de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, centré approximativement à 46°36' N / 77°25' O (Fig. 2). Il se trouve à la lisière du Bouclier canadien, dans la région forestière des Grands Lacs et du Saint-Laurent.

L'intérêt de ce site réside principalement dans le fait qu'il est composé de peuplements naturels, mixtes et homogènes, et de nombreuses plantations possédant différentes caractéristiques de dimension, de hauteur et de densité, ce qui a permis la délimitation de plusieurs secteurs témoins pour l'étude. Les peuplements naturels sont composés de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloïdes* Michx), de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de pins rouges (*Pinus resinosa* Ait.). Les plantations sont constituées de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.), de pins rouges (*Pinus resinosa* Ait.), de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.), de mélèzes laricins (*Larix laricina* (Du Roi) Koch) et de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloïdes* Michx). La région est légèrement valonnée avec des pentes inférieures à 4^o (Leckie, 1990)



Figure 2 Localisation du site d'étude

2.2 Description des données de télédétection

Les données utilisées pour l'étude proviennent du capteur aéroporté MEIS-II du Centre canadien de télédétection. Elles ont été acquises le 29 août 1986 vers 10:00 heure locale, à 50 cm de résolution spatiale, dans huit bandes spectrales étroites s'étendant du bleu au proche-infrarouge (Fig. 3; Tabl. 1).



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

Tableau 1 Caractéristiques des bandes spectrales MEIS-II utilisées pour l'étude.

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

2.3 Détermination des classes de couvert forestier

Un examen des images MEIS-II, couplé à des informations provenant d'une carte forestière et des relevés de terrain, a permis de distinguer 20 classes de couvert forestier sur la base de quatre variables, soit l'espèce, la hauteur, la densité, calculée en nombre de troncs par unité de surface, et l'organisation en peuplement naturel ou en plantation (Tabl. 2 et 3). Des sites jugés représentatifs de chacune des classes ont été identifiés sur l'image et vérifiés sur le terrain. Le pixel correspondant approximativement au centre de chaque site a été localisé; cette information a été conservée pour le reste de l'étude.

Classe	Nbre de sites	Hauteur*	Densité *
1: Peupliers faux-trembles	6	1	5
2: Peupliers faux-trembles	7	2	3
3: Peupliers faux-trembles	7	2	2
4: Pins gris (plantations)	7	1	4
5: Pins gris (plantations)	7	2	4
6: Pins gris (plantations)	7	1	3
7: Pins gris (plantations)	7	2	3
8: Pins gris (plantations)	6	2	2
9: Pins gris (plantations)	8	1	1
10: Pins gris	6	2	3
11: Pins gris	6	2	2
12: Pins gris	3	2	1
13: Pins rouges (plantations)	7	2	2
14: Pins rouges	7	3	2
15: Pins rouges	8	3	1
16: Pins sylvestres	3	1	1
(plantations)			
17: Pins sylvestres	3	2	1
(plantations)	_		
18: Pins sylvestres (plantations)	3	2	1 (<5%)
19: Mélèzes (plantations)	2	2	3
20: Pins et peupliers faux-trembles (forêt mixte à	7	4	2
21: Peupliers faux-trembles et pins (forêt mixte à tendance feuillue)	7	4	2

Tableau 2 Classes forestières déterminées pour l'étude.

* selon les classes établies au tableau 3.

Tableau 3 Classes de hauteur et de densité de tronc.

	Classes de densité de tronc (%)	
Classes de hauteur (m) 1: 0 - 5 2: 6 - 10 3: 11 - 15 4: 16 - 20	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	

2.4 Description de l'algorithme de ré-échantillonnage spatial des données

La première méthode de ré-échantillonnage spatial utilisée dans cette étude consiste à agréger des pixels voisins sur la base d'une moyenne arithmétique simple. Cette méthode suppose une réponse spatiale idéale du capteur qui générerait le résultat obtenu où le bruit induit par l'atmosphère et les diverses composantes physiques du système d'acquisition serait nul.

L'acquisition d'images de télédétection repose sur la prémisse que le contenu en information des pixels constitue une représentation correcte et fiable des objets détectables à la surface du sol. Dans le cas d'une réponse au capteur idéale, l'information contenue dans chaque pixel d'une image devrait correspondre à la luminance mesurée des objets au sol sur une surface exactement délimitée par la résolution spatiale du capteur. En d'autres mots, il devrait exister une correspondance "parfaite" entre l'information spectrale d'un pixel et les objets au sol délimités par la résolution spatiale en une localisation géographique donnée. Cependant, dans des conditions réelles d'acquisition de données par un capteur à barrette, tel que MEIS, du bruit est introduit par l'atmosphère et les composantes du système d'acquisition, soient la lentille, les détecteurs et le système électronique d'échantillonnage, ce qui réduit la qualité des images ainsi produites. La capacité d'un système d'acquisition à reproduire fidèlement une scène s'exprime généralement par la fonction de transfert de modulation (FTM) (Fig. 4).



Figure 4 Représentation schématique de la FTM pour les différentes composantes d'un système d'acquisition de données à barrette (adapté de Billingsley *et al.*, 1983, p. 723).

Dans le cadre de cette étude, un algorithme de ré-échantillonnage spatial basé sur la moyenne arithmétique est utilisé afin de tester l'hypothèse d'une résolution spatiale optimale dans des conditions idéales d'acquisition de données. Si l'étude est concluante, la même hypothèse sera alors vérifiée en utilisant un algorithme de rééchantillonnage qui simule la FTM associée aux composantes physiques d'un capteur à barrette. Il a été démontré que l'effet multiplicatif des composantes physiques d'un capteur, tel que MEIS, peut altérer de façon importante la qualité du signal enregistré (R. Gauthier, 1992, communication personnelle). Dans le contexte de la présente étude, les effets atmosphériques sont considérés comme secondaires.

L'algorithme opère à partir du pixel central de chacun des sites représentatifs des classes forestières préalablement identifiées. La valeur de gris de ce pixel central est d'abord enregistrée. L'algorithme délimite ensuite un voisinage de pixels à l'aide d'une fenêtre impaire qui croît selon un incrément de un pixel autour du pixel central. La moyenne est calculée sur chaque voisinage de pixels définissant ainsi une série de valeurs correspondant à de nouvelles résolutions spatiales multiples de la résolution originale de 50 cm. La taille maximale de la fenêtre est fixée en fonction de la dimension approximative des sites qui varient entre dix et trente mètres.

2.5 Description de la méthode d'identification de la résolution spatiale optimale pour chacune des classes

La méthode d'identification de la résolution spatiale optimale repose sur l'hypothèse qu'il existe une situation d'équilibre entre les propriétés de la classe forestière à discriminer, telles que l'espèce, la hauteur et la densité des arbres, et la résolution spatiale qui minimise la variance spectrale de cette classe. A chaque étape du processus de ré-échantillonnage spatial, la variance interne de chaque classe forestière est donc calculée à partir des valeurs de gris résultantes pour chaque site représentatif de la classe. Le calcul est effectué sur chacune des huit bandes spectrales originales afin de vérifier la solidité de la tendance exprimée entre la variance de la classe et la série de résolutions spatiales produites dans des conditions diverses de réflectance bidirectionnelle.

3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les figures 5 à 25 présentent les résultats obtenus pour chacune des 20 classes forestières de l'étude. Le graphique de la variance en fonction de la résolution spatiale pour les huit bandes spectrales est d'abord illustré. La résolution spatiale à laquelle la variance est la plus faible ou commence à se stabiliser est indiquée entre deux flèches. Une sous-image de la bande 1 de MEIS-II (centrée à 776 nm), à 50 cm de résolution spatiale, montrant un des sites représentatifs de la classe de même que le voisinage de pixels correspondant à la résolution spatiale optimale, accompagne le graphique.

L'analyse de ces figures permet de faire ressortir un certain nombre de tendances. La résolution spatiale optimale n'est pas déterminée de façon prioritaire par l'espèce d'arbres et ce, pour toutes les espèces considérées dans l'étude. Par exemple, dans le cas des trois classes de peupliers faux-trembles, la résolution spatiale identifiée comme optimale est respectivement de 750 cm, 350 cm et 1550 cm (Fig. 5, 6 et 7).

C'est donc la hauteur et la densité des arbres qui influencent le plus directement la variance spectrale des classes forestières. L'effet varie toutefois en fonction de l'espèce et de l'organisation du peuplement, c'est-à-dire qu'il soit naturel ou en plantation. Ainsi, dans le cas des plantations de pins gris, la hauteur des arbres joue un rôle important: lorsqu'elle est faible (entre 0 m et 5 m) pour des densités de classe 4, 3 et 1, la résolution spatiale optimale se situe entre 350 cm et 550 cm (Fig. 8, 10 et 13); lorsqu'elle est plus élevée (entre 6 m et 10 m), la variance spectrale intra-classe est minimisée à des résolutions beaucoup plus grossières, soient entre 950 cm et 1550 cm et ce, malgré des densités plus semblables de classe 4, 3 et 2 (Fig. 9, 11 et 12). Dans le cas des pins gris naturels, pour une même classe de hauteur (2), plus la densité des arbres est faible, plus la résolution spatiale optimale est élevée (Fig. 14, 15 et 16). Elle est à 950 cm pour une densité de classe 3. C'est aussi le cas des pins rouges où pour une hauteur de classe 3, la résolution spatiale optimale à une densité de classe 2 est de 350 cm et grimpe à 850 cm lorsque la densité diminue à la classe 1 (Fig. 18 et 19).

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. Une telle relation peut aussi être observée dans le cas des plantations,



Peupliers faux-trembles, hauteur: 1, densité: 5



H = 8 Metres 1:709

Figure 5 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.



Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 3



Figure 6 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.



Peupliers faux-trembles, hauteur: 2, densité: 2



_____l = 8 Metres 1:709

Figure 7 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 1, densité: 4



Figure 8 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 2, densité: 4



Figure 9 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 1, densité: 3



------ = 8 Metres 1:709

Figure 10 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 2, densité: 3



Figure 11 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 2, densité: 2



Figure 12 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.



Pins gris (plantation), hauteur: 1, densité: 1



Figure 13 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.



Pins gris (naturels), hauteur: 2, densité: 3



------- = 8 Metres 1:709

Figure 14 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.



Pins gris (naturels), hauteur: 2, densité: 2



Figure 15 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.



Pins gris (naturels), hauteur: 2, densité: 1

= 8 Metres 1:709

Figure 16 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.

Pins rouges (plantation), hauteur: 2, densité: 2

H = 8 Metres 1:709

Figure 17 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.

Pins rouges (naturels), hauteur: 3, densité: 2

Figure 18 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.

Pins rouges (naturels), hauteur: 3, densité: 1

r = 1 = 0 Metres 1.709

Figure 19 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.

Pins sylvestres (plantation), hauteur: 1, densité: 1

------ = 8 Metres 1:709

Figure 20 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.

Pins sylvestres (plantation), hauteur: 2, densité: 1

Figure 21 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.

Pins sylvestres (plantation), hauteur: 2, densité: 1 (<5%)

Figure 22 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.

Mélèzes laricins (plantation), hauteur: 2, densité: 3

Figure 23 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.

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

Figure 24 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.

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

Figure 25 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.

mais s'avère moins évidente. En effet, le fait que l'espacement des arbres et la dominance d'une espèce ne soient pas régis par des facteurs naturels, mais imposés, perturbe les couronnes des arbres, ce qui se traduit par une variance relativement élevée même à des densités élevées. Ce phénomène est révélé sur les portions d'images représentant des sites de plantations de pins gris (Fig. 8, 9, 10 et 11).

L'effet de la densité des arbres se révèle plus marqué chez les peupliers fauxtrembles. Pour une classe de hauteur 2, la résolution spatiale optimale se trouve à 350 cm lorsque la densité est de classe 3 (entre 50% et 75%) et à 1550 cm lorsque la densité est plus faible (entre 25% et 50%) (Fig. 6 et 7). Cette tendance est probablement due au fait que les couronnes de feuillus sont plus transparentes que celles des conifères et laissent davantage entrevoir le fond de scène, ce qui augmente considérablement la variance spectrale lorsque la densité est faible. L'effet de la transparence des couronnes chez les peupliers faux-trembles se vérifie aussi lorsque les arbres sont très petits (entre 0 m et 5 m) même si leur densité est élevée (>100%). En ce cas, la résolution spatiale optimale se situe à 750 cm (Fig. 5).

Certaines classes forestières montrent deux baisses marquées de la variance spectrale à des résolutions spatiales différentes. C'est le cas notamment des peupliers faux-trembles (Fig. 7), des pins gris (Fig. 16), des pins rouges (Fig. 18), des pins sylvestres (Fig. 20) et de la forêt mixte à tendance résineuse (Fig. 24) et feuillue (Fig. 25). La première baisse de la variance se situe à des résolutions spatiales fines, de l'ordre de 150 cm à 350 cm, qui correspondent approximativement à la dimension des couronnes d'arbre. La seconde baisse se situe à des résolutions plus grossières qui correspondent alors plutôt à la dimension du peuplement. Ce phénomène se manifeste surtout dans le cas de peuplements naturels où la distribution des arbres n'est pas contrôlée.

L'exemple des pins gris montre que la variance spectrale tend à se stabiliser plus rapidement en fonction de la résolution spatiale dans le cas des plantations que dans le cas des peuplements naturels, plus hétérogènes spatialement (Fig. 8 à 16). Cette tendance semble aussi se manifester chez les conifères lorsque comparés aux feuillus, ce qui s'expliquerait par la différence de la structure des couronnes et de l'activité phénologique. L'ensemble de ces observations permet d'affirmer les constatations suivantes. 1) Pour chacune des classes forestières considérées, il existe une résolution spatiale qui minimise la variance intra-classe et ce, pour une gamme de bandes spectrales s'étendant du bleu au proche-IR. Cette résolution se situe entre 250 cm et 2150 cm (Tabl. 4). La résolution la plus fine correspond à la dimension approximative d'une couronne d'arbre alors que les résolutions plus grossières intègrent plusieurs éléments au sol dans des proportions variables, soient des couronnes d'arbre, 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 des caractéristiques spatiales (hauteur, densité et organisation des arbres) qui déterminent le plus la résolution spatiale optimale. Toutefois, il est probable que l'espèce joue un rôle important dans la variance inter-classe, ce qui sera vérifié lors d'analyses subséquentes.

Classe	Hauteur*	Densité [*]	Résolution spatiale optimale (cm)
1: Peupliers faux-trembles	1	5	750
2: Peupliers faux-trembles	2	3	350
3: Peupliers faux-trembles	2	2	1550
4: Pins gris (plantations)	1	4	550
5: Pins gris (plantations)	2	4	1550
6: Pins gris (plantations)	1	3	450
7: Pins gris (plantations)	2	3	950
8: Pins gris (plantations)	2	2	1050
9: Pins gris (plantations)	1	1	350
10: Pins gris (naturels)	2	3	350
11: Pins gris (naturels)	2	2	650
12: Pins gris (naturels)	2	1	950
13: Pins rouges (plantations)	2	2	250
14: Pins rouges	3	2	350
15: Pins rouges	3	1	850
16: Pins sylvestres (plantations)	1	1	650
17: Pins sylvestres	2	1	750
(plantations) 18: Pins sylvestres	2	1 (<5%)	850
(plantations)		-	
19: Mélèzes (plantations)	2	3	850
20: Pins et peupliers faux-trembles (forêt mixte à	4	2	2150
tendance résineuse) 21: Peupliers faux-trembles et pins (forêt mixte à tendance feuillue)	4	2	2050

Tableau 4 Résolution spatiale optimale identifiée pour chacune des classes forestières.

* selon les classes établies au tableau 3

4. SUITE PRÉVUE DES TRAVAUX

Les résultats obtenus jusqu'ici ont démontré qu'il existe une résolution spatiale qui minimise la variance intra-classe. La prochaine étape de l'étude consistera à analyser la variance inter-classe de façon à obtenir une représentation complète de la distribution des nuages de points, correspondant aux différentes classes forestières, dans l'espace spectral multi-dimensionnel et de vérifier leur séparabilité. Des analyses de variance bivariées et multivariées seront réalisées pour répondre à cet objectif.

Une deuxième étape ultérieure de l'étude consistera à identifier la résolution spatiale optimale à partir de données générées par un algorithme de ré-échantillonnage spatial intégrant la FTM théorique d'un capteur à barrette. Cette fonction est calculée dans deux directions, soient orthogonale et parallèle à la barrette de détecteurs, et intègre 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 (Fig. 26; Équations 1 à 11). Lorsque traduite dans le domaine spatial, la fonction résultante de chacune des directions, alors exprimée en unités de pixel, sera utilisée pour créer le filtre de ré-échantillonnage spatial qui sera appliqué sur les données originales.

Finalement, l'étude sera reprise sur des images MEIS-II d'automne, acquises le 29 octobre 1985, sur le même secteur de la forêt expérimentale de Petawawa. Cette étape aura pour but de vérifier la consistence des résultats concernant la résolution spatiale optimale dans des conditions différentes d'acquisition des données originales, telles que la saison, l'angle d'illumination et les conditions atmosphériques.

Figure 26 FTM théoriques d'un capteur à barrette pour une longueur d'onde de 500 nm (d'après Zwick *et al.*, 1978).

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

 $FTM_{0=}$ 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,

 $FTM_{D} = 1a FTM$ 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 analogique au numérique,

 $FTM_{I} = la FTM du système de production de l'image.$

où:

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

où:

 \mathbf{f}_{no} = ouverture de la lentille, idéalement supérieure à 2.8,

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

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

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:

 $y = f_m \lambda F$

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

où:

 \mathbf{p} = l'espacement entre les diodes, alors que $\mathbf{p}/2$ représente la taille des diodes.

Dans le cas de la FTM orthogonale à la barrette de détecteurs, la FTM G devient:

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{G}} = \frac{\sin(\pi \mathbf{F}\mathbf{p})}{(\pi \mathbf{F})}$$
(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,

$$d = 5 \mu m$$

$$0 = 50 \,\mu m$$

$$\mathbf{L} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{L_{0}^{2}} + (2\pi\mathbf{F})^{2}}}$$
(8)

(4)

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{S}} = \frac{\sin(\pi \mathbf{FP})}{(\pi \mathbf{FP})}$$
(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_0 . Dans le cas de la FTM parallèle à la barrette de détecteurs:

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{E}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\mathbf{F}/\mathbf{F}_{0}\right)^{8}}}$$
(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.

$$\mathbf{FTM}_{\mathbf{DA}} = \frac{\sin(\pi \mathbf{F} \mathbf{p})}{(\pi \mathbf{F} \mathbf{p})}$$
(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.

5. CONCLUSION

Le principal objectif de cette étude était de déterminer les résolutions spatiales optimales pour la détection et la discrimination de différentes classes forestières à partir d'un éventail de bandes spectrales du capteur MEIS-II. Des travaux antérieurs ont en effet démontré qu'il n'existe pas une résolution spatiale unique adaptée à l'ensemble des couverts forestiers composant une scène. Chaque objet géographique possède des caractéristiques spatiales qui lui sont propres qui doivent être prises en considération, en relation avec la résolution spatiale du capteur, afin d'en optimiser le potentiel de détection et de discrimination spectrale.

Le site d'étude représente un secteur de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario. Des sites représentatifs de 20 classes forestières, caractérisées par l'espèce, la hauteur, la densité et l'organisation du peuplement, ont été identifiés. Les données originales MEIS-II, acquises le 29 aôut 1986 à 50 cm de résolution spatiale dans huit bandes spectrales, ont été ré-échantillonnées jusqu'à 10 m, 15 m, 20 m et 30 m selon les sites, à l'aide d'un algorithme basé sur la moyenne arithmétique simulant une fonction de transfert de modulation idéale d'un capteur. La variance intra-classe dans chaque bande spectrale a ensuite été calculée pour chacune des résolutions spatiales. La résolution spatiale à laquelle la variance est la plus faible ou tend à se stabiliser est identifiée comme étant la résolution spatiale optimale de cette classe.

Les résultats obtenus ont révélé que l'espèce joue un rôle secondaire dans la relation entre la résolution spatiale et la variance alors que les caractéristiques spatiales des classes ont une influence déterminante. Ainsi, dans le cas des plantations étudiées, lorsque la hauteur des arbres est faible (entre 0 m et 5 m), la variance devient faible à des résolutions spatiales fines de l'ordre de 350 cm à 550 cm. A une classe de hauteur supérieure, les résolutions spatiales optimales se situent alors entre 950 cm et 1550 cm. Dans le cas des peuplements naturels, au fur et à mesure que la densité du couvert diminue, la variance intra-classe tend à se minimiser à des résolutions spatiales de plus en plus grossières. Par exemple, pour les trois classes de pins gris naturels à une hauteur de classe 2, la résolution spatiale optimale se situe à 350 cm, 650 cm et 950 cm pour des classes respectives de densité de 3, 2 et 1. Ces tendances se vérifient pour les huit bandes spectrales utilisées.

Cette étude confirme donc qu'il existe une résolution spatiale qui minimise la variance spectrale de chaque classe forestière en fonction des caractéristiques spatiales et spectrales qui lui sont propres. Les résolutions spatiales identifiées comme optimales pour les 20 classes forestières considérées se situent entre 250 cm et 2150 cm. Les résolutions les plus fines correspondent approximativement à la dimension de la couronne des arbres alors que les résolutions plus grossières représentent l'agrégation, dans des proportions variables, de couronnes d'arbres, d'ombrage et de sous-bois.

La première étape ultérieure de l'étude consistera à effectuer des analyses de variance bivariées et multivariées afin d'évaluer la variance inter-classe et ainsi obtenir une représentation complète de la distribution des nuages de points correspondant aux différentes classes forestières dans l'espace spectral multi-dimensionnel. L'étude sera ensuite reprise en utilisant un algorithme de ré-échantillonnage spatial simulant la FTM théorique d'un capteur à barrette. Finalement, des données d'automne acquises audessus du même secteur seront utilisées pour vérifier la solidité de la résolution spatiale optimale dans des conditions différentes d'acquisition.

6. RÉFÉRENCES

- Billingsley, F.C., 1983. Data Processing and Reprocessing. in Manual of Remote Sensing, Volume 1, R.N. Colwell, ed., American Society of Photogrammetry, Falls Church, U.S.A., pp. 719-792.
- Leckie, D.G., 1990. Synergism of Synthetic Aperture Radar and Visible/Infrared Data for Forest Type Discrimination. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, no. 9, pp. 1237-1246.
- Marceau, D.J., 1992. The Problem of Scale and Spatial Aggregation in Remote Sensing: An Empirical Investigation Using Forestry Data. Ph.D. thesis, Department of geography, University of Waterloo, 180 p.
- Marceau, D.J., P.J. Howarth et D.J. Gratton, 1992. Étude du contenu spectral et spatial d'images numériques et de l'impact sur la classification automatisée d'un couvert forestier. 3ièmes Journées du Réseau Télédétection de l'AUPELF/UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990.
- Zwick, H., J. N. de Villiers and W. McColl, 1978. Laboratory Evaluation of the Prototype MEIS (Multi-detector Electro-Optical Imaging Scanner). Energie, Mines et Ressources Canada, Centre Canadien de Télédétection, Rapport de recherche 78-5, 24 p.