UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE MULTITEMPORELLE DES CHANGEMENTS CAUSÉS PAR LES DOMMAGES ANNUELS DE LA TORDEUSE DES BOURGEONS DE L'ÉPINETTE D'APRÈS DEUX CAPTEURS SATELLITAIRES DIFFÉRENTS

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

AMAR MOKRANE

DÉCEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'encadrement et le soutien de mon directeur de recherche, Benoît St-Onge, directeur du département de géographie à l'Université du Québec à Montréal. Il m'a apporté de précieux conseils tout le long de ce projet. Je lui suis aussi très reconnaissant de m'avoir fait confiance pour ce projet et j'espère avoir répondu à ses attentes.

Je souhaite d'autre part remercier les membres du jury d'avoir accepté de corriger mon mémoire. Je désire également remercier Ives Boilard et Pierre De-Rainville, les deux techniciens du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), d'avoir mis à ma disposition tous les documents nécessaires pour la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier mon père et ma mère, qui malgré la distance, m'ont apporté du soutien durant ces années. Enfin, un grand merci tout spécial à ma femme.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES vii
LISTE DES TABLEAUX xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS xiv
RÉSUMÉ xvi

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I
APERÇU GÉNÉRAL DES INSECTES S'ATTAQUANT AUX FORÊTS DU CANADA ET DU QUÉBEC 3
1.1 Généralités 3
1.2 Les principaux ravageurs au Québec 5
1.2.1 La tordeuse des bourgeons de l'épinette 5
1.2.2 Le dendroctone de l'épinette 6
1.2.3 La livrée des forêts 8
1.2.4 L'arpenteuse de la pruche 9
1.2.5 Le scolyte du sapin de l'Ouest 11
1.2.6 Dendroctone du pin ponderosa 12
1.2.7 La tordeuse du pin gris 13
1.2.8 La spongieuse 14
1.2.9 Le charançon du pin blanc 16
1.2.10 Le diprion du sapin 17
1.3 Dégâts récents de certains types d'insectes 18

CHAPITRE II
PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DÉTECTION SPECTRALE DES ARBRES ATTAQUÉS PAR LES INSECTES 21
2.1 Réflectance et transmittance des plantes 21

2.2 Variation de la signature spectrale en forêt 23
2.3 Identification des plates-formes satellitaires 25
2.4 La compatibilité et le choix des capteurs 28

CHAPITRE III
REVUE DES MÉTHODES DE TRAITEMENT DES IMAGES POUR LA DÉTECTION DES CHANGEMENTS 30
3.1 Problématique de la détection de changements 30
3.2 Taxonomie des principales méthodes de détection de changements 32
3.3 Méthodes utilisées pour la détection des dommages causés par des insectes 33
3.3.1 Études basées sur des images d'un même capteur 33
3.3.2 Études basées sur des images multitemporelles 37
3.4 Choix des méthodes de détection des changements 41

CHAPITRE IV
MÉTHODOLOGIE 42
4.1 Description de la zone d'étude 42
4.1.1 Description générale 42
4.1.2 La végétation 43
4.1.3 L'épidémie de la TBE sur l'Île d'Anticosti 43
4.2 Données utilisées 46
4.2.1 Données images 46
4.2.2 Données de référence 47
4.3 Prétraitement des données 48
4.3.1 Correction géométrique des images 49
4.3.2 Corrections radiométriques 51
4.3.2.1 Correction atmosphérique 51
4.3.2.2 Correction des effets de lignage 53
4.3.3 Découpage des secteurs d'études 53
4.3.3.1 Masquage des nuages 54
4.3.3.2 Masquage des zones ne pouvant être affectées 55
4.3.3.3 Moyennes par classe de dommages 58
4.4 Calcul des rapports de bandes 58

4.4.1 Les propriétés spectrales du rouge et du PIR 59
4.4.2 Les indices de végétation 59
4.4.2.1 L'indice de végétation de la différence normalisé (NDVI) 60
4.4.2.2 Indice de végétation (VIN) 61
4.4.2.3 Indice de végétation avec compensation des effets de sol (SAVI) 62
4.4.3 Rapports de bande 62
4.5 Comparaison multitemporelle 63
4.5.1 Par classe de dommages 63
4.5.1.1 Calcul de la moyenne par classe 63
4.5.1.2 Comparaison 64
4.5.2 La différence 65
4.5.3 La corrélation 65
4.5.3.1 Corrélation entre les bandes 65
4.5.3.2 Corrélations des différences 66
4.5.4 ANOVA et ANCOVA 66

CHAPITRE V
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 69
5.1 Prétraitement des données 69
5.1.1 Corrections géométriques 69
5.1.2 Corrections radiométriques 73
5.1.2.1 Corrections atmosphériques 73
5.1.2.2 Correction des effets de lignage 73
5.1.3 Découpage des secteurs d'étude 75
5.2 Comparaison multitemporelle 77
5.2.1 Par classe de dommages 77
5.2.1.1 Calcul de la moyenne par classe 77
5.2.1.2 Comparaison des images 79
5.2.2 Différence 81
5.2.3 Corrélations 82

5.2.4 ANOVA et ANCOVA 83
5.2.4.1 Analyse de variance (ANOVA) 83
5.2.4.2 Analyse de covariance (ANCOVA) 86

CHAPITRE VI
INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS 93
6.1 Rappel de l'hypothèse centrale 93
6.2 Discussion 93
6.3 Comparaison des images 97
6.4 Image de différence 99

CONCLUSION GÉNÉRALE 100

BIBLIOGRAPHIE 102

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	La tordeuse des bourgeons de l'épinette.	5
1.2	Le dendroctone de l'épinette.	8
1.3	La livrée des forêts.	8
1.4	L'arpenteuse de la pruche.	10
1.5	Le scolyte du sapin.	11
1.6	Le dendroctone du pin ponderosa.	12
1.7	La tordeuse du pin gris.	13
1.8	La spongieuse.	15
1.9	Le charançon du pin blanc.	16
1.10	Le diprion du sapin.	17
2.1	Signature spectrale typiques des végétaux.	22
2.2	Exemples de réflectance pour une feuille verte et malade.	24
2.3	Longueurs d'onde de LANDSAT et SPOT.	29

3.1 Image multispectrale classifiée de pins gris infestés par la tordeuse de pin gris. 37

3.2 Peuplements infestés par le dendroctone du pin ponderosa 39

4.1 Localisation de l'Île d'Anticosti 42

4.2 Dommages de la tordeuse des bourgeons de l'épinette de l'Île d'Anticosti en 2008. 46

4.3 Zone de dommages de la tordeuse des bourgeons de l'épinette de l'Île d'Anticosti d'après les observations aériennes (juillet 2007). 48

4.4 Schéma méthodologique des prétraitements. 49

4.5 Les effets du lignage dans le canal rouge de LANDSAT 2007. 53

4.6 Les étapes de masquage des images. 54

4.7 Image SPOT 2007 après masquage des nuages. 55

4.8 Image LANDSAT 2006 après le premier découpage. 55

4.9 Classification de l'image LANDSAT 2006. 57

4.10 Masque des peuplements forestiers potentiellement affectés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. 58

4.11 Applications du coefficient de corrélation. 66

5.1 Ortho-image LANDSAT du 13 juillet 2006. 70

5.2 Ortho-image LANDSAT du 16 juillet 2007. 70

5.3 Ortho-image SPOT du 13 juillet 2007. 70

5.4 Bande rouge de l'ortho-image LANDSAT de 2006. 71

5.5 Bande rouge de l'ortho-image LANDSAT de 2007. 71

5.6 Bande rouge de l'ortho-image SPOT de 2007. 71

5.7 Bande PIR de l'ortho-image LANDSAT de 2006. 72

5.8 Bande PIR de l'ortho-image LANDSAT de 2007. 72

5.9 Bande PIR de l'ortho-image SPOT de 2007. 72

5.10 Lignage dans le canal rouge de LANDSAT 2007 74

5.11 Lignage après traitement dans le canal rouge de LANDSAT 2007. 74

5.12 Zone d'étude de dommages finale. 75

5.13 Zone d'étude après masquage de l'image LANDSAT 2006 76

5.14 Zone d'étude après masquage de l'image LANDSAT 2007 76

5.15 Zone de dommages de l'image LANDSAT 2007. 76

5.16 Moyenne du PIR des trois images. 84

5.17 Moyenne de la bande rouge pour L6, L7 et S7. 85

5.18 Moyenne des NDVI des trois images 86

5.19 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L6 et L7. 88

5.20 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L6 et L7..... 89

5.21 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L6 et L7..... 89

5.22 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L6 et S7..... 90

5.23 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L6 et S7..... 90

5.24 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L6 et S7. 91

5.25 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L7 et S7..... 91

5.26 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L7 et S7..... 92

5.27 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L7 et S7. 92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Page

1.1 Taxonomie et description de la tordeuse des bourgeons de l'épinette 6

1.2 Taxonomie et description du dendroctone de l'épinette 7

1.3 Taxonomie et description de la livrée des forêts 9

1.4 Taxonomie et description de l'arpenteuse de la pruche 10

1.5 Taxonomie et description du scolyte du sapin de l'Ouest 11

1.6 Taxonomie et description du dendroctone du pin ponderosa 13

1.7 Taxonomie et description de la tordeuse du pin gris 14

1.8 Taxonomie et description de la spongieuse 15

1.9 Taxonomie et description du charançon du pin blanc 17

1.10 Taxonomie et description du diprion du sapin 18

2.1 Liste des caractéristiques des principaux satellites 29

2.2 Bandes spectrales de LANDSAT et SPOT 29

4.1 Superficie des zones (en hectares) infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec depuis 1967 45

4.2 Liste des images retenues 47

4.3 Les étapes de la création du MNA 50

4.4 Les paramètres de la correction atmosphérique 52

4.5 Les conditions météorologiques à la date de prise des images 52

4.6 Liste des classes sur l'image LANDSAT 2006 57

4.7 Liste des variables 63

4.8 Objectifs de comparaison des moyennes 64

5.1 RMS de la correction des images 69

5.2 La superficie des classes 75

5.3 Moyenne avant correction atmosphérique 78

5.4 Moyenne après correction atmosphérique 78

5.5 Moyenne après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage 78

5.6 Application du coefficient de corrélation avant correction atmosphérique 80

5.7 Application du coefficient de corrélation après correction atmosphérique 80

5.8 Application du coefficient de corrélation après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage 80

5.9 La différence entre les images après correction atmosphérique 81

5.10 La corrélation entre les différences 82

5.11 Test de probabilité ANOVA (P) 83

5.12 Test de probabilité ANCOVA (P) 87

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANCOVA	Analyse de covariance
ANOVA	Analyse de variance
CCMF	Conseil canadien des ministres des forêts
CCOG	Conseil canadien de géomatique GéoBase
EDE	Bulletin d'information, Environnement Canada
EWDI	Indice différentiel amélioré d'hydratation superficielle
IFN	Inventaire forestier national
LANDSAT	Capteur Landsat 5 TM
L6	Landsat 2006
L7	Landsat 2007
MRNFQ	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec
MIR	Moyen infrarouge
NDVI	Indice de végétation de la différence normalisé
NOAA	Administration nationale de l'océan et de l'atmosphère

PIR	Proche infrarouge
R	La bande rouge
RMS	Erreur moyenne quadratique
SPOT	Capteur Spot 5 HRG
S7	Spot 2007
SAVI	Indice de végétation avec compensation des effets de sol
TBE	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
VIN	Indice de végétation

RÉSUMÉ

La forêt couvre 40 % de la superficie terrestre, et le Canada en possède 10 % à lui seul, en majorité en milieu boréal. Le besoin de planification et de gestion que cette réalité entraîne n'a pu jusqu'ici être qu'imparfaitement satisfait par des méthodes traditionnelles de mise à jour de l'inventaire forestier, d'où la nécessité de recourir à la télédétection, et principalement à l'interprétation des images satellitaires. Dans ce contexte, les perturbations causées par les insectes constituent l'un des défis majeurs pour la mise à jour de l'inventaire forestier national (IFN).

Pour effectuer le suivi de la détection des dommages causés par les insectes avec plus d'efficacité, il faut comparer des images de télédétection multidates afin de localiser les changements et d'identifier, parmi ces derniers, ceux qui découlent d'épidémies d'insectes.

L'évolution des capteurs spatiaux (pannes, nouveaux lancements, etc.) nous pousse à rechercher des solutions fiables et à effectuer des comparaisons multidates à l'aide de capteurs différents. Les différences qui existent au niveau des caractéristiques de ces capteurs nous incitent à analyser chaque situation pour identifier les couples compatibles de capteurs, eu égard de plus aux exigences de la détection des dommages causés par les insectes. Après l'analyse des caractéristiques de plusieurs capteurs, nous avons trouvé que les satellites LANDSAT et SPOT répondent parfaitement aux conditions de détection de changements de notre étude. Pour faire une telle comparaison, des calculs entre bandes spectrales et indices de végétation ont été réalisés.

À travers les différents calculs que nous avons appliqués pour cette étude, nous pouvons dire que pour LANDSAT, les différences entre bandes et rapports de bandes sont bien marquées par rapport aux degrés de dommages par comparaison à SPOT et LANDSAT. À cause de l'incohérence et de la faiblesse de certains résultats, des tests statistiques ANOVA et ANCOVA ont été réalisés ; ils nous ont montré que les différences entre les bandes et rapports de bandes selon l'intensité des dommages sont significatives. En conclusion, pour réaliser une bonne détection des dommages, un même capteur serait préférable tandis que le choix de deux capteurs différents rendrait la détection difficile.

Mots clés : télédétection, images multidates, dommages d'insectes, détection des changements, forêts.

INTRODUCTION

Les perturbations causées par les insectes constituent l'un des défis majeurs pour la mise à jour de l'inventaire forestier national (IFN). Un grand pays couvert de forêts comme le Canada a ainsi besoin de méthodes efficaces et précises de détection des changements. Cela permet en effet de répondre aux exigences croissantes en information de même qu'à la nécessité politique de respecter des engagements issus de traités internationaux tels que la Convention sur le changement du climat (Protocole de Kyoto) et la Convention sur la diversité biologique.

Les procédures traditionnelles de gestion des forêts au Canada sont fondées sur des méthodes manuelles (par exemple l'interprétation de photos aériennes) pour mettre à jour l'inventaire forestier. Bien que ces techniques soient efficaces, elles sont coûteuses; par conséquent, la fréquence de mise à jour des inventaires est faible (Gillis et Leckie, 1993). Les perturbations forestières peuvent rapidement changer la quantité et l'état de cette ressource, elles peuvent ainsi se produire pendant des intervalles de temps plus courts que les cycles de mise à jour des inventaires traditionnels. Des méthodes fondées sur des images satellitaires ont donc été développées pour détecter rapidement ces changements et actualiser l'IFN.

La détection des dommages causés par les insectes s'effectue avec plus d'efficacité en comparant des images de télédétection multidates afin de trouver les changements et, parmi ceux-ci, identifier ceux qui découlent d'épidémies d'insectes, qu'en analysant une seule image à la fois. Cependant, l'évolution des capteurs spatiaux (pannes, nouveaux lancements, etc.) nous pousse à rechercher des solutions fiables et à effectuer des comparaisons multidates à l'aide de capteurs différents. Les différences qui existent au niveau des caractéristiques de ces capteurs nous incitent à analyser chaque situation pour identifier les couples compatibles de

capteurs, eu égard de plus aux exigences de la détection des dommages causés par les insectes.

L'objectif de notre étude est de vérifier si l'analyse de couples d'images multitemporelles provenant de différents capteurs qui comportent des bandes spectrales similaires (LANDSAT, SPOT, etc.) conduit à des résultats équivalents à ceux basés sur des images d'un même capteur. Si nous pouvons démontrer que des couples hétérogènes d'images peuvent être utilisés pour la cartographie des dommages, cela sera beaucoup plus facile à l'avenir d'obtenir des images pour une région donnée, sur une année donnée, au cours de la période critique, par exemple, celle pendant laquelle les aiguilles prennent une couleur rougeâtre (soit à la mi-juillet), suite a une infestation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE).

Notre travail est divisé en six parties : nous donnerons dans le chapitre I un aperçu général des principaux insectes au Canada et au Québec et de leurs dommages au couvert forestier.

Nous traiterons dans le chapitre suivant des méthodes de télédétection conçues pour la détection des changements spectraux causés par les insectes ravageurs par l'utilisation d'images multicapteurs et multitemporelles.

Dans le chapitre III, nous décrirons quelques études déjà réalisées qui concernent la détection des dommages causés par les insectes. Le chapitre IV présentera notre zone d'étude et discutera de la méthodologie appliquée pour la détection des dégâts d'insectes par l'emploi de différentes images. Dans le chapitre V, nous détaillerons les résultats des différents calculs que nous avons appliqués, résultats que nous discuterons et interprèterons dans le chapitre VI avec des interprétations statistiques plus détaillées.

CHAPITRE I

APERÇU GÉNÉRAL DES INSECTES S'ATTAQUANT AUX FORÊTS DU CANADA ET DU QUÉBEC

1.1 Généralités

Le Canada, avec sa superficie de 9 972 800 km², présente une certaine homogénéité en termes de relief ainsi qu'un climat rigoureux sur de grandes superficies, particulièrement dans le Nord. Tout cela, ajouté à la dernière glaciation (qui a éliminé la biocénose presque partout), a contribué à simplifier l'environnement canadien. Toutefois, les vastes superficies de terres (et la variété de facteurs physiographiques, climatiques et édaphiques qui en découlent), les nombreuses masses d'eau douce et la topographie variée des montagnes favorisent la diversification des organismes et contribuent à créer des composantes régionales distinctes.

La faune canadienne est caractérisée par la présence de beaucoup d'insectes. On a ainsi déjà dénombré près de 34 000 espèces d'arthropodes terrestres au Canada et l'on pense que le nombre d'espèces qui n'ont pas encore été décrites est presque équivalent. Plus de 2 000 espèces d'arthropodes terrestres – les trois quarts étant des insectes – ont par ailleurs déjà été décrites pour l'Arctique et l'on pense là aussi qu'il pourrait en rester autant à découvrir. De plus, plusieurs centaines d'espèces vivent dans le Grand Nord (Danks, 1988). Certaines espèces s'attaquent aux arbres et provoquent périodiquement des dégâts considérables qui ont des effets négatifs sur les services que rend la forêt. En effet,

> Les forêts canadiennes fournissent un habitat à quelque 140 000 espèces sauvages, dont bon nombre ne sont toujours pas répertoriées. Elles produisent de l'oxygène et absorbent du dioxyde de carbone de l'atmosphère, un gaz contribuant au changement climatique. De plus, elles purifient l'eau, tempèrent le climat, stabilisent les sols et régularisent le débit de l'eau. Ainsi, que ce soit pour des raisons écologiques ou économiques, il est important de maintenir nos forêts en bonne santé (EDE, 1999.)

De plus, l'exploitation forestière constitue une importante source d'emplois et d'avantages économiques pour les Canadiens. En effet, en 1997, 366 000 personnes occupaient des emplois dans des activités liées à la foresterie. Au cours de la même année, l'apport du secteur forestier au produit intérieur brut a atteint près de 17 milliards de dollars, soit 2,5 % de l'ensemble de notre économie.

Entre 1981 et 1995, 33 Mha de forêt canadienne ont été perturbés, que ce soit par la récolte, les incendies, les insectes ou les maladies, ce qui correspond à une moyenne annuelle de 2,2 Mha. Selon le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF), « [...] les insectes ont ravagé environ 13 millions d'hectares de forêt au Canada en 2004 » (CCMF, 2006). Beaucoup de ravageurs Nord-Américains communs qui ont pour cible les cultures et les forêts sont un fléau pour le Canada. Les espèces capables de causer des dommages à grande échelle ou dans des régions particulières se comptent par centaines; ce nombre ne représente toutefois qu'une petite fraction de l'ensemble de la faune entomologique. Nous avons choisi de ne présenter dans ce travail qu'un nombre limité de ravageurs présentant un intérêt écologique particulier.

Une connaissance approfondie des insectes nuisibles constitue l'élément clé de la protection des forêts contre des épidémies dévastatrices. Lorsqu'on connaît les conditions de vie préférées des insectes, leur mode d'alimentation et de reproduction, et leurs prédateurs, il devient possible de prévoir une infestation (Dorais *et al.*, 2006).

1.2 Les principaux ravageurs au Québec

Nous présentons dans les lignes suivantes les caractéristiques des principaux insectes forestiers. Ces insectes sont considérés par Ressources naturelles Canada comme les insectes les plus nuisibles pour les forêts canadiennes. Ils sont responsables de dégâts importants et leur distribution spatiale est relativement grande.

1.2.1 La tordeuse des bourgeons de l'épinette

La tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) est considérée à juste titre comme le plus grave fléau des forêts de conifères de l'Amérique du Nord (Rose et Lindquist, 1994); (voir Tableau 1.1 et Figure 1.1). Cet insecte affecte 25 espèces de conifères, soit huit sortes d'épinettes, six sortes de pins, cinq types de sapins, trois types de pruches, deux types de mélèzes et un type de genévrier. Bien qu'il préfère le sapin, cet insecte peut également affecter gravement l'épinette blanche *(Picea glauca)* et l'épinette rouge (*P. Rubens*); (Martineau, 1985).

Figure 1.1 La tordeuse des bourgeons de l'épinette.
Source : Ministère des Ressources naturelles
et de la Faune du Québec (MRNF, 2008).

Tableau 1.1 Taxonomie et description de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Nom latin	*Choristoneura fumiferana* (Clemens)
Nom français	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
Nom anglais	Spruce budworm
Ordre	Lepidoptera
Famille	Tortricidae
Hôte(s) principal (aux)	Épinette blanche, épinette de Norvège, épinette noire, épinette rouge, mélèze laricin, pin gris, pruche du Canada, sapin baumier
Régime et comportement alimentaire	• Hétéroconophage • Phyllophage • Perceur • Tisseuse
Micro-habitat(s)	Aiguille, Bourgeon, Cône, Fleur mâle
Distribution	Partout au Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

L'hôte principal de cet insecte est le sapin baumier; en été, les aiguilles des arbres défoliés prennent une couleur rouge, et en automne une couleur grise. Les attaques prolongées et répétées de la TBE peuvent endommager sérieusement les branches et les cimes et finir par tuer les arbres.

1.2.2 Le dendroctone de l'épinette

Originaire d'Amérique du Nord, sa répartition est transcontinentale (voir Tableau 1.2 et Figure 1.2). Cet insecte attaque l'épinette blanche dans le nord-est du continent et en Colombie-Britannique, et l'épinette d'Engelmann au Colorado (Martineau, 1985). Ses hôtes préférés comprennent toutes les espèces d'épinettes ainsi que le pin tordu lorsqu'il est mélangé à l'une d'entre elles.

Les dommages commencent à la base de l'arbre. Les adultes et les larves de cet insecte commencent à creuser des galeries dans le bois pour empêcher la circulation de la

sève; les feuilles deviennent également de couleur brune et commencent à tomber. La présence de cet insecte dans les arbres favorise l'apparition de champignons responsables d'un bleuissement du bois.

Tableau 1.2 Taxonomie et description du dendroctone de l'épinette

Nom latin	*Dendroctonus rufipennis* (Kirby)
Nom français	Dendroctone de l'épinette
Nom anglais	Spruce beetle
Ordre	Coleoptera
Famille	Curculionidae
Hôte(s) principal (aux)	Épinette blanche, épinette noire, épinette rouge
Régime et comportement alimentaire	• Phyllophage • Perceur
Micro-habitat(s)	Débris ligneux, Écorce, Souche, Tronc
Distribution	Colombie-Britannique, Nouvelle-Écosse, Ontario, Québec, Terre-Neuve, Yukon

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Ces insectes préfèrent attaquer des arbres de gros diamètre touchés par un incendie ou des vents violents, ou encore ceux laissés parmi les déchets de coupe. Ils constituent une menace plutôt dans l'ouest du Canada, car ils sont peu abondants dans l'est (Martineau, 1985).

Figure 1.2 Le dendroctone de l'épinette.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

1.2.3 La livrée des forêts

Originaire d'Amérique du Nord, la livrée des forêts attaque les forêts de feuillus et préfère en particulier le peuplier faux-tremble (voir Tableau 1.3 et Figure 1.3). Lors d'invasions généralisées, elle s'attaque à toutes les essences feuillues excepté l'érable rouge (Martineau, 1985).

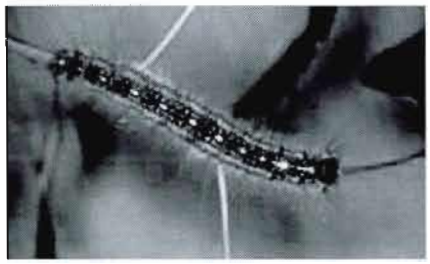

Figure 1.3 La livrée des forêts.
Source : (MRNF, 2008).

Tableau 1.3 Taxonomie et description de la livrée des forêts

Nom latin	*Malacosoma disstria* Hubner
Nom français	Livrée des forêts
Nom anglais	Forest tent caterpillar
Ordre	Lepidoptera
Famille	Lasiocampidae
Hôte(s) principal (aux)	Boulcau à papier, bouleau gris, cerisier, chêne rouge, érable à sucre, frêne blanc, hêtre à grandes feuilles, orme d'Amérique, peuplier faux-tremble, pommier, saule, sorbiers, tilleul d'Amérique
Régime et comportement alimentaire	• Phyllophage • Défoliateur libre
Micro-habitat(s)	Feuille
Distribution	Partout au Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dommages commencent par la présence de chenilles de couleurs remarquables. Hors-saison, elle se caractérise par des amas d'œufs en forme d'anneau que l'on peut facilement observer sur les branchages des arbres. Les petites larves quittent l'amas d'œufs et se déplacent vers les feuilles pour les manger (Rose et Lindquist, 1997).

1.2.4 L'arpenteuse de la pruche

L'arpenteuse de la pruche est considérée comme un défoliateur d'une grande importance (voir Tableau 1.4 et Figure 1.4). On la trouve depuis la côte Atlantique jusqu'en Alberta. Le principal hôte de cet insecte dans l'est du canada est le sapin baumier alors que dans l'ouest, c'est la pruche. Pendant les périodes de dommages graves et prolongées observées dans le sud de l'Ontario et jusqu'à Terre-Neuve, l'arpenteuse de la pruche s'alimente sur d'autres conifères et même sur des feuillus (comme le bouleau, l'érable et le peuplicr). Depuis la première infestation de 1912, cet insecte a causé des ravages particulièrement importants à Terre-Neuve où l'on enregistre des épidémies qui persistent de trois à six ans et qui reviennent tous les 10 à 15 ans (Martineau, 1985).

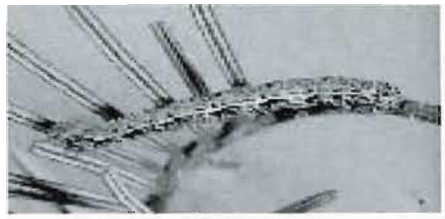

Figure 1.4 L'arpenteuse de la pruche.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dommages causés par cet insecte sont visibles dans les peuplements purs de sapin baumier et dans les peuplements contenant un mélange sapin baumier/épinette blanche, et quelques fois, sapin baumier/épinette noire. Ces dommages se caractérisent par la diminution de la croissance et, éventuellement, la mort de l'arbre. Les arbres tués se trouvent presque toujours dans les peuplements mûrs de sapin baumier et de la pruche du Canada.

Tableau 1.4 Taxonomie et description de l'arpenteuse de la pruche

Nom latin	*Lambdina fiscellaria* (Guenée)
Nom français	Arpenteuse de la pruche
Nom anglais	Hemlock looper
Ordre	Lepidoptera
Famille	Geometridae
Hôte(s) principal (aux)	Bouleau à papier, épinette blanche, épinette noire, érable à sucre, pruche du Canada, sapin baumier
Régime et comportement alimentaire	• Phyllophage • Défoliateur libre
Micro-habitat(s)	Aiguille, feuille
Distribution	Partout au Canada

Source Ressources naturelles Canada (2008).

1.2.5 Le scolyte du sapin de l'Ouest

Cet insecte se trouve en particulier dans l'ouest de l'Amérique du Nord (voir Tableau 1.5 et Figure 1.6). De 1956 à 1965, c'était l'insecte le plus défoliateur en Colombie-Britannique. Ce perceur de bois est responsable de pertes importantes (estimées à des millions de mètres cubes de bois) chez le sapin subalpin des Rocheuses, qui est son principal hôte. Il attaque aussi quelques fois le sapin gracieux *(Abies amabilis)* et, plus rarement, l'épinette blanche et l'épinette d'Engelmann (*Picea engelmannii*).

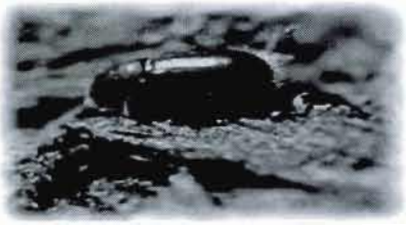

Figure 1.5 Le scolyte du sapin.
Source : Garbutt (1992).

Tableau 1.5 Taxonomie et description du **scolyte du sapin de l'Ouest**

Nom latin	*Dryocoetes confusus* Swaine
Nom français	Scolyte du sapin de l'Ouest
Nom anglais	Western balsam bark beetle
Ordre	Coléoptères
Famille	Curculionidés
Hôte(s) principal (aux)	Sapin subalpin, sapin gracieux, épinette blanche, épinette d'Engelmann
Régime et comportement alimentaire	• xylophage • Perce-bois
Micro-habitat(s)	Bois
Distribution	Ouest de l'Amérique du Nord

Source : Garbutt (1992).

Les dégâts causés par cet insecte sont dus en grande partie à la multiplication du champignon *Ceratocystis dryocoetidis* (bleuisseuse) qu'il transporte. L'arbre se libère ordinairement des premiers scolytes, mais la propagation du champignon dans le phloème facilite les attaques suivantes. Après avoir été introduit, le champignon cause des lésions unies qui peuvent finir par tuer l'arbre, et ce, même sans attaque ultérieure du scolyte (Garbutt, 1992).

1.2.6 Dendroctone du pin ponderosa

Le dendroctone du pin ponderosa, présent dans l'ouest du Canada, attaque le pin ponderosa (son principal hôte) ainsi que d'autres pins, dont le pin tordu, le pin argenté, le pin flexible et le pin sylvestre (Ives et Wong, 1988); (voir Tableau 1.6 et Figure 1.6).

Figure 1.6 Le dendroctone du pin ponderosa.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dégâts qu'il cause commencent par le creusement de galeries dans l'écorce interne pour pondre des œufs, provoquant ainsi un effet d'annélation. Après cela, les larves creusent des tunnels latéraux à partir de ces galeries principales. Les dendroctones transportent en outre des champignons responsables d'un bleuissement du bois. Ces champignons prolifèrent rapidement dans tout l'aubier et finissent par boucher les vaisseaux, causant par conséquent la mort de l'arbre.

Tableau 1.6 Taxonomie et description du dendroctone du pin ponderosa

Nom latin	*Dendroctonus ponderosae* Hopkins
Nom français	Dendroctone du pin ponderosa
Nom anglais	Mountain pine beetle
Ordre	Coléoptères
Famille	Curculionoidea
Hôte(s) principal (aux)	Pin gris, pin tordu, pin à écorce blanche, pin jaune, pin argenté, pin arisé
Régime et comportement alimentaire :	• Phyllophage • Perceuse de bois
Micro-habitat(s)	Écorce, bois
Distribution	Colombie-Britannique, Alberta, Saskatchewan

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

1.2.7 La tordeuse du pin gris

Au Canada, la tordeuse du pin gris est présente du Nouveau-Brunswick jusqu'en Alberta; son principal hôte est le pin gris (voir Tableau 1.7 et Figure 1.7). Elle attaque également le pin sylvestre, parfois le mélèze et le sapin lorsque ces deux espèces sont mélangées au pin gris. Dans les peuplements mélangés, le pin blanc et le pin rouge peuvent aussi être attaqués (Ives et Wong, 1988).

Figure 1.7 La tordeuse du pin gris.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dégâts que cause cet insecte se manifestent dans la partie supérieure de la cime, entraînant ainsi la réduction de la croissance de l'arbre qui, par la suite, se déforme et meurt. Cet insecte occasionne également des dégâts importants dans les peuplements naturels de pin gris et dans les plantations de pin sylvestre situées dans le centre du Canada et à proximité des Grands Lacs aux États-Unis (Martineau, 1985).

Tableau 1.7 Taxonomie et description de la tordeuse du pin gris

Nom latin	*Choristoneura pinus* Freeman
Nom français	Tordeuse du pin gris
Nom anglais	Jack pine budworm
Ordre	Lepidoptera
Famille	Tortricidae
Hôte(s) principal (aux)	Pin gris, pin sylvestre
Régime et comportement alimentaire	• Hétéroconophage • Phyllophage • Pollinivore • Perceur • Tisseuse
Micro-habitat(s)	Aiguille, bourgeon, cône, fleur mâle
Distribution	Partout au Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

1.2.8 La spongieuse

La spongieuse est originaire des régions tempérées d'Europe, d'Afrique et du sud de l'Asie (voir Tableau 1.8 et Figure 1.8). Elle s'est répandue depuis tout l'est des États-Unis jusque dans le sud du Québec ainsi que dans les régions du sud et du centre de l'Ontario (Rose et Lindquist, 1997). Cet insecte est l'un des ravageurs les plus destructeurs pour les végétaux en raison du nombre élevé de ses hôtes (plus de 500 espèces différentes de plantes) et aussi de l'altitude à laquelle il endommage les arbres.

Figure 1.8 La spongieuse.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Ses hôtes préférés sont le chêne, le bouleau à papier, le mélèze, le tilleul, le saule, l'érable à feuilles composées, le peuplier, le pommier et l'aulne rugueux, auxquels s'ajoutent le hêtre, la pruche, le pin et l'épinette lorsque le développement de la larve est à moitié complet (Martineau, 1985).

Tableau 1.8 Taxonomie et description de la spongieuse

Nom latin	*Lymantria dispar* (Linnaeus)
Nom français	Spongieuse
Nom anglais	Gypsy moth
Ordre	Lepidoptera
Famille	Noctuidae
Hôte(s) principal (aux)	Bouleau à papier, bouleau gris, caryer, cerisier, chêne rouge, épinette, érable à sucre, érable rouge, frêne, hêtre à grandes feuilles, mélèze, orme d'Amérique, peuplier faux-tremble, peuplier, pin, pommier, pruche du Canada, sapin baumier, saule
Régime et comportement alimentaire	• Phyllophage • Défoliateur libre
Micro-habitat(s)	Aiguille, feuille
Distribution	Est du Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dégâts commencent par la présence de masses d'œufs sur les troncs et les branches. Les larves sont à l'origine de la totalité des dommages pendant les deux dernières semaines d'alimentation (juin). Lors d'une grave infestation, tous les arbres sont fortement

défoliés, ce qui se traduit par une diminution importante de la croissance des feuillus (comme le chêne) et la mort dès la première année (comme dans le cas du pin).

1.2.9 Le charançon du pin blanc

Le charançon du pin blanc est sans contredit le ravageur le plus fréquent des conifères dans tout l'est de l'Amérique septentrionale (voir Tableau 1.9 et Figure 1.9). Son hôte préféré est le pin blanc, mais on peut le trouver sur presque toutes les espèces de pins – et même sur l'épinette (Rose et Lindquist, 1999).

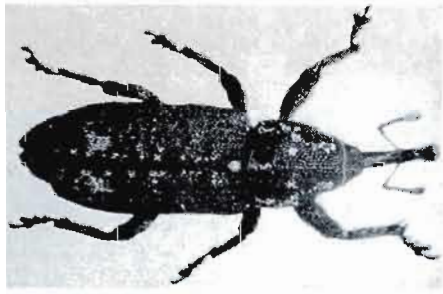

Figure 1.9 Le charançon du pin blanc.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les dégâts du charançon du pin blanc sont causés à la fois par l'adulte et la larve lors de leur alimentation (Martineau, 1985). L'adulte préfère les bourgeons principaux des arbres, causant ainsi des dommages importants. En perçant des petits trous dans les écorces d'arbres, il favorise également l'entrée de champignons pathogènes. Par contre, l'alimentation des larves sous l'écorce induit les dommages les plus sérieux en affectant gravement les tissus conducteurs.

Tableau 1.9 Taxonomie et description du charançon du pin blanc

Nom latin	*Pissodes strobi* (Peck)
Nom français	Charançon du pin blanc
Nom anglais	White pine weevil
Ordre	Coleoptera
Famille	Curculionidae
Hôte(s) principal (aux)	Épinette blanche, épinette de Norvège, pin blanc, pin gris, pin sylvestre
Régime et comportement alimentaire	• Phyllophage • Perceur
Micro-habitat(s)	Flèche
Distribution	Partout au Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

1.2.10 Le diprion du sapin

Le diprion du sapin est une espèce indigène largement répandue au Canada et aux États-Unis (voir Tableau 1.10 et Figure 1.10). Son hôte préféré est le sapin baumier, mais cet insecte peut également s'alimenter sur l'épinette. Au Québec, il attaque principalement les peuplements à prédominance de sapin baumier. Les dommages sont tous causés par les larves et relèvent de trois ordres : la défoliation, la réduction de croissance et une légère mortalité du sapin (Martineau, 1985).

Figure 1.10 Le diprion du sapin.
Source : Ressources naturelles Canada (2008).

Les feuilles des arbres constituent la nourriture principale du diprion du sapin. Les infestations prolongées et répétées peuvent réduire la croissance des arbres, ce qui les rend plus vulnérables à l'attaque d'autres organismes.

Tableau 1.10 Taxonomie et description du diprion du sapin

Nom latin	*Neodiprion abietis* (Harris)
Nom français	Diprion du sapin
Nom anglais	Balsam fir sawfly
Ordre	Lepidoptera
Famille	Diprionidae
Hôte(s) principal (aux)	Épinette blanche, épinette noire, sapin baumier
Régime et comportement alimentaire :	• Phyllophage • Défoliateur libre
Micro-habitat(s)	Aiguille
Distribution	Partout au Canada

Source : Ressources naturelles Canada (2008).

1.3 Dégâts récents de certains types d'insectes

Après avoir présenté les principaux insectes ravageurs au Canada et au Québec, il est important de signaler leurs dégâts récents dans les forêts québécoises. Selon le bilan annuel 2007 du MRNF, parmi les insectes qui ont causé plus de dégâts vient en tête la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Les aires en étant infestées ont progressé substantiellement en 2007. Elles totalisent maintenant 110 743 hectares comparativement à 50 498 hectares lors de l'année 2006. La progression de l'épidémie s'est manifestée principalement dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue (5 948 ha), du Saguenay-Lac-Saint-Jean (6 910 ha) et de la Côte-Nord (53 990 ha). Toutefois, les infestations relevées dans les régions de l'Outaouais (43 271 ha), des Laurentides (26 ha), du Centre-du-Québec (4 ha) et de la Mauricie (594 ha) n'ont pas connu d'expansion importante par rapport à 2006. Dans l'ensemble des régions infestées par la TBE, les dégâts ont été observés presque exclusivement dans les forêts privées, sauf dans la région de la Côte-Nord où l'épidémie affecte les forêts publiques. En

2007, dans cette dernière région, une infestation d'envergure (23 730 ha) a été détectée sur l'Île d'Anticosti. Pour ce qui est de l'arpenteuse de la pruche, la dernière épidémie d'envergure fut en 2001 : près de 925 000 hectares dans la région de la Côte-Nord avaient été ravagés. En 2007, aucun dommage n'a été relevé pour cet insecte.

La livrée des forêts, qui attaque principalement le peuplier faux-tremble, a été notée plus fréquemment en 2007. Des dommages légers ou des colonies ont été aperçues dans quelques régions de la province : le Saguenay-Lac -Saint-Jean, la Mauricie, l'Outaouais et l'Abitibi-Témiscamingue. Des dommages au niveau de trace ont été relevés près de Saint-Félicien (unité de gestion de Roberval et de Saint-Félicien) et de Ville-Marie (unité de gestion du Témiscamingue). De plus, dans les unités de gestion du Saguenay-Sud et Shipshaw, du Témiscamingue et de Rouyn-Noranda, quelques peuplements supportaient de faibles populations (présence de colonies au tronc). La présence de la livrée a aussi été récemment signalée dans les régions de la Mauricie, de l'Outaouais et de la capitale nationale.

En 2007 la spongieuse, a été trouvée dans plusieurs régions du Québec dont celles de l'Outaouais, des Laurentides, de la Montérégie, de la Mauricie et du Centre-du-Québec. En Outaouais, sur le chêne rouge, des dommages modérés ont été notés à Fort-William (unité de gestion de la Coulonge) et des dommages légers à Perkins et à Caldwell dans les unités de gestion de la Basse-Lièvre et de la Coulonge. Les hêtres à grandes feuilles du lac de l'Épinette (unité de gestion de la Basse-Lièvre) ont subi de très faibles dommages (niveau trace). Des dégâts de même niveau ont été relevés dans une plantation de chênes rouges située près de Saint-Anicet (région de la Montérégie). Des populations plus ou moins importantes ont été observées sur les chênes, les peupliers et les érables dans les régions de l'Outaouais, des Laurentides, de la Montérégie, de la Mauricie et du Centre-du-Québec. Malgré la présence de chenilles, très peu de dommages ont été observés.

La plupart des dégâts d'insectes s'observent pendant l'été, lorsque les aiguilles et les feuilles des arbres deviennent rousses (dommages graves). Pour mieux visualiser ces dégâts

dans des images satellitaires, il est donc important que ces images soient prises pendant cette période. Celle-ci étant de courte durée, et le territoire n'étant pas toujours observable à partir de l'espace en raison de la nébulosité, il est clair que le fait de pouvoir compter sur plusieurs satellites différents augmente les chances d'obtenir des images au cours de cette période, ou du moins, au cours d'un été.

Avant de s'attaquer à la problématique de traitement d'images de capteurs différents, nous présentons une revue de littérature sur la question de la détection des dommages forestiers causés par les insectes ravageurs.

CHAPITRE II

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DÉTECTION SPECTRALE DES ARBRES ATTAQUÉS PAR LES INSECTES

Pour bien suivre et interpréter un épisode de dommages dans un domaine forestier sur des images satellitaires, la connaissance de la signature spectrale des arbres est essentielle. Nous aborderons dans ce chapitre, la réflectance et transmittance des végétaux, nous parlons aussi de la variation spectrale dans les forets. Enfin, nous identifions les principaux capteurs employés dans ce domaine.

2.1 Réflectance et transmittance des plantes

La réponse spectrale de la végétation dépend entre autres de la pigmentation, de la structure physiologique et du contenu en eau de la plante. Tous ces paramètres auront une influence sur les propriétés de réflectance[1], d'absorbance et de transmittance.

Ainsi, comme nous pouvons le constater sur la figure 2.1 ci-après, la végétation en général possède une réflectance :

- très faible dans le rouge (~660 nm) et le bleu (~450 nm) ;
- faible dans le vert (~546 nm) ;
- élevée dans le proche infrarouge (700-1000 nm).

[1] La réflectance est le rapport entre la quantité d'énergie solaire réfléchie par un corps (luminance) et la densité de flux radiant incident de l'énergie solaire (éclairement; Richards et Jia, 2006).

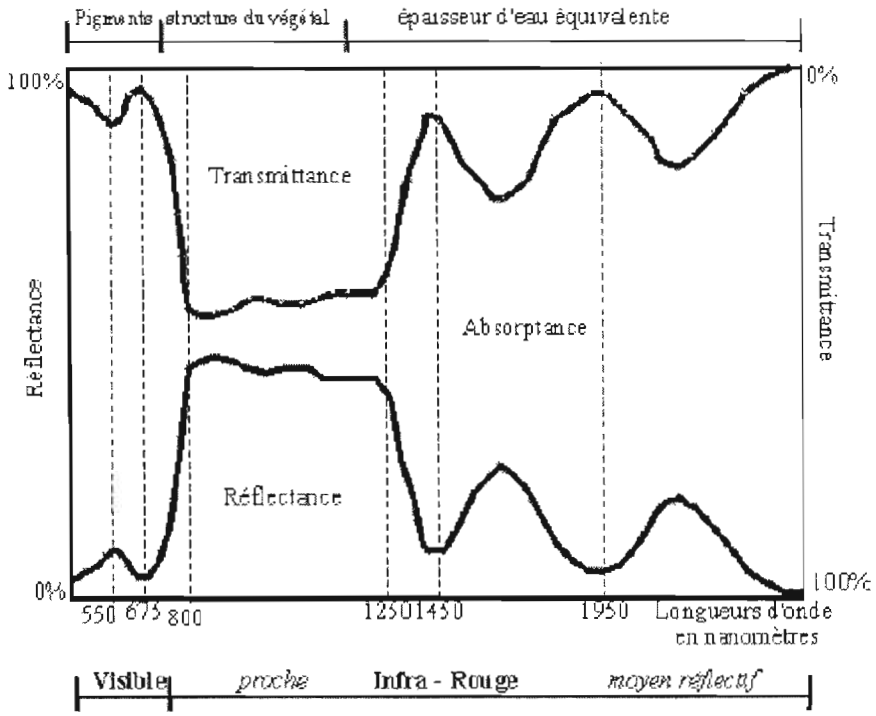

Figure 2.1 Signature spectrale typiques des végétaux.
Source : Guyot (1984).

Ces valeurs peuvent varier en fonction de la teneur en eau de la plante, de la structure des feuilles et de leur densité, ou encore de leur âge (Guyot, 1984). La réflectance plus élevée dans le vert traduit des propriétés discriminantes pour les végétaux. Malgré cet avantage, peu d'indices de végétation ont été élaborés à partir de la bande verte, probablement à cause de sa dépendance envers les conditions atmosphériques (Caloz et Collet, 2001).

Les bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) présentent un intérêt majeur. En effet, outre une plus faible dépendance envers les conditions atmosphériques, la première coïncide avec une forte absorption du rayonnement; la deuxième, au contraire, montre une réflectance élevée. Il en résulte un écart important entre ces deux niveaux. Des combinaisons de ces deux bandes sont donc susceptibles de produire de bonnes capacités

discriminantes, et par là même révéler des propriétés particulières des végétaux, ainsi que leur état de santé.

2.2 Variation de la signature spectrale en forêt

La signature spectrale des zones de dépérissement en forêt sur des images spatiales n'est pas aisément détectable, car elle peut être noyée par d'autres éléments de la zone étudiée. En effet, la surface relativement grande des pixels de ces images (par exemple 20x20 m dans le cas des images SPOT) représente au sol un agencement varié de couronnes d'arbres, mais aussi de leur ombre projetée et d'autres éléments environnants de natures diverses (sous-couvert végétal, sol...). De plus, la végétation herbacée, la densité des peuplements forestiers, l'exposition des versants boisés (vers le nord, le sud), l'angle d'incidence du satellite, la composition de l'atmosphère, l'inclinaison et l'intensité du rayonnement solaire, tous ces paramètres sont des éléments qui peuvent influencer la réflectance apparente, comme le soulignent Falkenström *et al.* (2002). Les infestations d'insectes entrainent tout de même des modifications sensibles de la réflectance.

Carter (1993), Koch *et al.* (1990) ont conclu que lorsqu'un arbre est attaqué, les premiers indices de dommages commencent par une diminution du taux foliaire, ce qui génère une élévation de la réflectance dans le bleu et dans le rouge et une diminution de celle-ci dans le vert. Dans le proche infrarouge (PIR, 0,7-1,2 µm), la réflectance d'aiguilles en santé sera très importante (>0,5). Cette réflectance n'est pas reliée aux pigments, mais plutôt à la structure interne des feuilles, de ce fait la chlorose[2] n'aura pas donc de grand effet. Dans l'infrarouge moyen (MIR; 1,2-2,5 µm), c'est plutôt le contenu en eau des aiguilles qui fera varier la réflectance pour cette longueur d'onde (Ardö, 1998). Dans le cas où la chlorose est sévère, cette relation est inversement proportionnelle, la réflectance dans le MIR va augmenter, ce qui diminuera la teneur en eau dans les aiguilles des arbres défoliés (Ardö, 1998; Carter, 1993).

[2] Chlorose : décoloration due à un manque de chlorophylle.

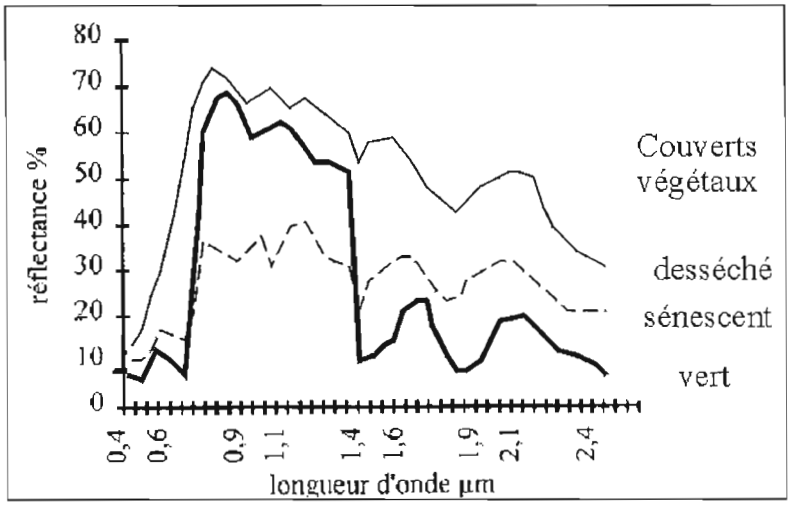

Figure 2.2 Exemples de réflectance pour une feuille verte et malade.
Source : Girard et Girard (1999).

Les effets des dommages peuvent être complexes. Dans le cas de dommages modérés, les ombres portées par les arbres demeurent denses, ce qui diminue la réflectance apparente des pixels dans le PIR, comme l'explique Koch *et al.* (1990). Toutefois pour des dommages graves, cet effet peut être masqué par la contribution de l'écorce des arbres qui a une réflectance plus élevée pour les longueurs d'onde (principalement dans le rouge), ce qui ramène l'augmentation de la réflectance des aiguilles, phénomène observé par (Ekstrand, 1994; Leckie *et al.*, 2004). Cependant, Ardö (1998) remarque dans le PIR que le pouvoir pénétrant de la lumière est plus grand par rapport aux autres longueurs d'onde de sorte que, dans ce domaine spectral, la réflectance est fortement influencée par l'épaisseur de la couche végétale vue du dessus. Dans le cas de dommages moyens à sévères, les changements de la structure interne des aiguilles ainsi que l'augmentation du pourcentage d'ombre sur toute l'épaisseur du couvert végétal et de celle de l'écorce, qui ont une réflectance inférieure aux aiguilles dans le PIR, entraînent globalement une forte diminution de celle-ci.

Plusieurs études ont conclu que les dommages entrainent une diminution significative du PIR (Ardö, 1998 ; Brockhaus *et al.*, 1992 ; Ekstrand, 1994 ; Koch *et al.*, 1990 ; Leckie *et al.*, 2004). Par contre, pour l'infrarouge moyen (MIR), la réflectance des écorces des arbres est à peu près équivalente à celles des aiguilles. Au fur à mesure que les dommages avancent,

l'écorce devient plus en plus visible et donc contribue à l'augmentation de la réflectance, comme observé par Koch *et al.* (1990) et Leckie *et al.* (2004).

Ajoutons à ce qui a été présenté concernant les dommages au niveau de l'arbre que d'autres facteurs peuvent changer la réflectance. Citons parmi eux les effets de l'atmosphère, qu'il est important de corriger avant d'entamer les études de séries temporelles d'images (Richards et Jia, 2006). Toujours dans ce contexte, d'autres facteurs peuvent aussi perturber la réflectance comme la topographie du milieu d'étude et l'éclairement reçu par une cible au sol. Ce dernier varie en fonction d'une part, du cosinus de l'angle entre la surface du sol et les rayons solaires, et d'autre part, de l'exposition des arbres sur des versants opposés au soleil (Ekstrand, 1996 ; Falkenström *et al.*, 2002).

2.3 Identification des plates-formes satellitaires

Nous inventorions ici les capteurs pertinents et décrivons leurs principales caractéristiques (résolution, bandes spectrales, etc.). Nous établirons également les compatibilités entre les différents capteurs (essentiellement les comptabilités au niveau des bandes spectrales). Nous limiterons ces comparaisons aux capteurs optiques qui opèrent dans le domaine spectral du rayonnement solaire réfléchi (visible, PIR, MIR), qui sont sensibles aux interactions (réflectance, absorption, transmittance, etc.).

Nous excluons les images radar qui sont davantage utilisées pour les applications s'intéressant à l'humidité ou à la rugosité. Toutefois, le fait que les images radar (telles que les RSO[3]) puissent apporter de l'information à tout moment, quel que soit le niveau d'éclairement et les conditions atmosphériques, offre un complément intéressant à l'imagerie optique, typiquement lorsque les nuages sont abondants.

[3] Radar à synthèse d'ouverture.

Nous ne considérerons pas les satellites à résolution grossière comme NOAA-AVHRR (résolution de 1000 m et plus) vu que l'information que l'on peut extraire de ces capteurs est très générale et que, par conséquent, nous n'aurions que très peu d'espoirs de détecter des dommages. Ces satellites sont plutôt utilisés pour cartographier la couverture végétale d'un continent et faire le suivi des grands écosystèmes (CGCP, 1988).

Pour commencer, nous devons identifier les capteurs optiques satellitaires qui permettraient la détection des changements (perturbations, coupes, infestation par des insectes) survenus en milieu forestier. Dans ce contexte, nous présentons ci-après une grille montrant les indicateurs suivants (Tableau 2.1) :

- bandes spectrales;
- résolution;
- couverture (dimensions de l'image);
- taux de répétition;
- date de lancement et durée de vie;
- nombre de plates-formes.

Tableau 2.1 Liste des caractéristiques des principaux satellites

	LANDSAT 5	LANDSAT 7	SPOT 4	SPOT 5	TERRA	JERS-1	IRS-1C	IRS-1D	ALOS	ALSAT 1	RESOURCESAT-1
PAYS	USA	USA	FRANCE	FRANCE	USA	JAPON	INDE	INDE	JAPON	ALGÉRIE	INDE
DATE DE LANCEMENT	1984	Avril 1999	Mars 1998	Mai 2002	Decembre 1999	Février 1992	Décembre 1995	Septembre 1997	Janvier 2006	Novembre 2002	Octobre 2003
ALTITUDE	705 km	705 km	822 km	830 km	705	568 km	904 km	904 km	691 km	680 km	817 km
CAPTEURS	TM (Thematic Mapper)	ETM + (Enhance Thematic Mapper)	HRVIR (Haute résolution visible et infrarouge)	HRG (Haute résolution géométrique)	ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	SOP (Senseur optique)	LISS3 (Linear Imaging Self-Scanner)	LISS3 (Linear Imaging Self-Scanner)	PRISM (Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping) AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer Type 2)	ALSAT-1	LISS3 (Linear Imaging Self-Scanner) LISS4 (Linear Imaging Self-Scanner)
TYPE	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Capteur actif à barrettes	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à balayage
BANDES SPECTRALES (Longueurs d'ondes en µm)	1 (B) [0,45-0,52] 2 (V) [0,52-0,60] 3 (R) [0,63-0,69] 4 (IR) [0,76-0,90] 5 (IRM) [1,55-1,75] 6 (IRT) [10,4-12,5] 7 (IRM) [2,09-2,35]	1 (B) [0,45,0,52] 2 (V) [0,53-0,61] 3 (R) [0,63-0,69] 4 (IR) [0,78-0,90] 5 (IRM) [1,55-1,75] 6 (IRT) [10,4-12,5] 7 (IRM) [2,09-2,35] (Pan) [0,52-0,90]	1 (V) [0,50-0,59] 2 (R) [0,61-0,68] 3 (IR) [0,79-0,89] 4 (IRM) [1,58-1,75] Pan [0,61-0,68]	1 (V) [0,50-0,59] 2 (R) [0,61-0,68] 3 (IR) [0,79-0,89] 4 (IRM) [1,58-1,75] Pan [0,51-0,73]	1 (V) [0,520 60] 2 (R) [0,63-0,69] 3 (IR) [0,78-0,86] 3B (IR) [0,76-0,90] 4 (IRM) [1,60-1,70] 5 (IRM) [2,145-2,185] 6 (IRM) [2,185-2,25] 7 (IRM) [2,235-2,85] 8 (IRM) [2,295-2,365] 9 (IRM) [2,36-2,43] 10 (TIR) [8,125-8,475] 11 (TIR) [8,475-8,25] 12 (TIR) [8,92-9,27] 13 (TIR) [10,25-10,95] 14 (TIR) [10,95-11,65]	1 (V) [0,52-0,60] 2 (R) [0,63-0,68] 3 (IR) [0,76-0,86] 4 (IR) [0,76-0,86] 5 (IRM) [1,60-1,71] 6 (IRM) [2,01-2,12] 7 (IRM) [2,13-2,25] 8 (IRM) [2,27-5,60]	1 (V) [0,52-0,59] 2 (R) [0,62-0,68] 3 (IR) [0,77-0,86] 4 (IRM) 1,53-1,70] Pan [0,50-0,75]	1 (V) [0,52-0,59] 2 (R) [0,62-0,68] 3 (IR) [0,77-0,86] Pan [0,50-0,75]	1 (B) [0,423-0,50] 2 (V) [0,52-0,60] 3 (R) [0,61-0,69] 4 (IR) [0,76-0,89]	1 (V) [0,52-0,62] 2 (R) [0,63-0,69] 3 (IR) [0,76-0,90]	LISS3 : 1 (V) [0,52-0,59] 2 (R) [0,62-0,68] 3 (IR) [0,77-0,86] 4 (IRM) 1,55-1,70] Pan [0,50-0,75] LISS4 : 1 (V) [0,52-0,59] 2 (R) [0,62-0,68] 3 (IR) [0,77-0,86]
RÉSOLUTION SPATIALE (dimension des pixels)	B(1,2,3,4,5,7) : 30 m B6 : 120 m	B(1,2,3,4,5,7) : 30 m B6 : 60 m Pan : 15 m	20 m Pan : 10 m	B4 : 20 m B1 B2 B3 : 10 m Pan : 5 m et 2 à 3 m	1, 2, 3 et 3B : 15 m 4 à 9 : 30 m 10 à 14 : 90 m	18 x 24 m	24 m Pan : 5,8 m	24 m Pan : 5 8 m	10 m Pan : 2,5 m	32 m	24 m Pan 5,8 x 5,8 m LISS4 MX : 5,8 x 5,8 m
DIMENSION D'UNE SCÈNE	185 x 172 km	185 x 172 km	60 x 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 x 66 km (80 km en visée latérale extrême)	60 x 60 km	75 x 75 km	142 x 142 km Pan : 70 x 70 km	142 x 142 km Pan : 70 x 70 km	70 km	600 x 560 km	142 x 142 km Pan : 70 x 70 km LISS4 MX : 24 x 24 km
STÉRÉOSCOPIE	Non	Non	Oui ± 27° d'inclinaison	Oui 2 modes : ± 27° d'inclinaison en visée oblique et avant-arrière	Oui (Bandes 3 et 3B)	Oui (Bandes 3 et 4)	Pan : Oui ± 26° d'inclinaison	Pan : Oui ± 26° d'inclinaison	Pan : Oui ± 24° d'inclinaison	Non	Pan : Oui ± 26° d'inclinaison
FRÉQUENCE DE PASSAGE	16 jours	16 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours	44 jours	24 jours (Pan 5 à 24 jours)	24 jours (Pan 5 à 24 jours)	46 jours	5 jours	24 jours (Pan et MX 5 à 24 jours)
VOCATION	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol, occupation urbaine et physiographie	Végétation et occupation du sol, occupation urbaine et physiographie	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol, occupation urbaine et physiographie
PARTICULARITÉ	Grande variété spectrale	Grande variété spectrale	Grande précision spatiale	Très grande précision spatiale	Grande variété spectrale	Grande variété spectrale	Grande précision spatiale	Grande précision spatiale	Haute résolution spatiale	Grande fauchée	Grande précision spatiale

2.4 La compatibilité et le choix des capteurs

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le but principal de cette étude est de vérifier si l'analyse de couples d'images multitemporelles provenant de différents capteurs qui comportent des bandes spectrales similaires conduit à des résultats équivalents à ceux basés sur des images d'un même capteur. Pour ce faire, nous tentons dans cette section et dans les chapitres qui suivent de démontrer que des couples hétérogènes d'images peuvent être utilisés pour la cartographie des dommages, suite à une infestation générale et particulièrement, celle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE). Pour éclairer cette analyse, nous avons rassemblé dans le tableau 2.1 les caractéristiques principales de certains capteurs. En les comparant, on peut s'apercevoir que le système parfait n'existe pas : chacun possède ses avantages et ses inconvénients.

Notre application concerne les peuplements forestiers. Il est donc primordial de choisir des capteurs comportant des bandes spectrales plus ou moins similaires. Les séries de satellites LANDSAT et SPOT sont les plus connues et les plus utilisées pour la foresterie au Québec et au Canada (Gougeon, 2006). Pour cette raison, nous nous concentrons sur des deux capteurs.

Dans notre étude, la bande rouge et la bande proche infrarouge sont les plus utilisées, car c'est surtout à travers elles que se manifestent la vitalité et le stress de la végétation (Figure 2.2). Les longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge des deux satellites LANDSAT TM 5 et SPOT 5 sont presque similaires, raison pour laquelle ils sont retenus pour notre étude (Figure 2.3).

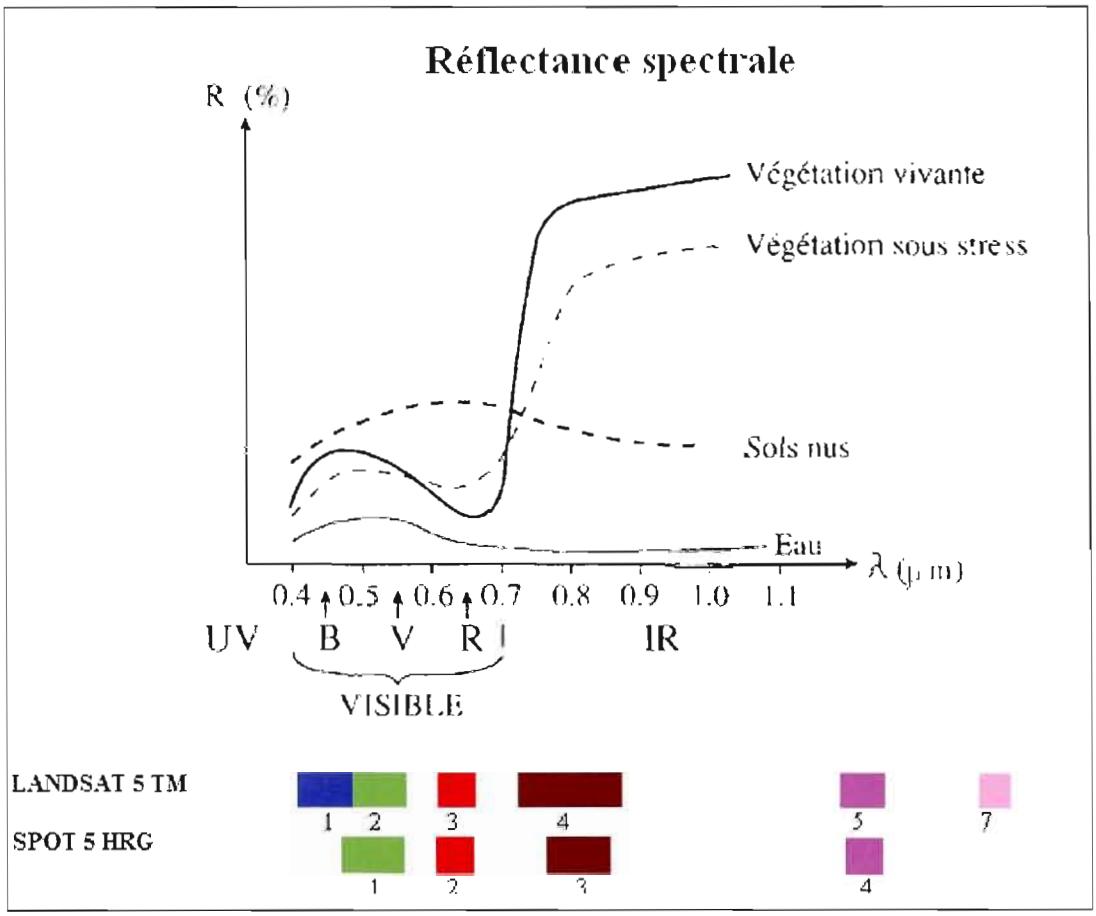

Figure 2.3 Longueurs d'onde de LANDSAT et SPOT.

Tableau 2.2 Bandes spectrales de LANDSAT et SPOT

LANDSAT 5 TM (µm)	SPOT 5 (µm)
Bande 1 : 0,450-0,520 (bleu)	Bande 1 : 0,500-0,590 (vert)
Bande 2 : 0,520-0,600 (vert)	Bande 2 : 0,610-0,690 (rouge)
Bande 3 : 0,630-0,690 (rouge)	Bande 3 : 0,790-0,890 (PIR)
Bande 4 : 0,760-0,900 (PIR)	Bande 4 : 1,580-1,75 (MIR)
Bande 5 : 1,55-1,75 (MIR)	
Bande 6 : 10,04-12,50 (IRT)	
Bande 7 : 2,08-2,35 (MIR)	

CHAPITRE III

REVUE DES MÉTHODES DE TRAITEMENT DES IMAGES POUR LA DÉTECTION DES CHANGEMENTS

Pour étudier les changements causés par les dommages d'insectes, l'analyse d'images multidates est souvent utilisée. On parle alors de télédétection du changement, une méthode de traitement d'images connaissant des applications très diverses que nous abordons dans la première partie de ce chapitre. Nous présentons ensuite une taxonomie sommaire des principales méthodes de détection de changement, pour finalement nous pencher sur des études sur la détection de dommages d'insectes dans les massifs forestiers, en se basant sur des images d'un même capteur.

3.1 Problématique de la détection de changements

L'essor des technologies liées à l'imagerie satellite se manifeste par une croissance marquée de la production d'images satellites de plus en plus ciblée sur de nombreux objectifs d'observation en rapport avec la protection ou la surveillance de la planète. De nombreuses problématiques abordées aujourd'hui en télédétection sont liées à la détection de changements, c'est-à-dire à la caractérisation et à la localisation des zones qui ont évolué entre deux instants ou deux périodes données (à partir de deux observations ou séquences d'observations) sur un même territoire. Cette évolution peut être naturelle et correspondre à la croissance de la végétation, à une inondation, à un incendie, un glissement de terrain, etc. Elle peut aussi être liée à l'activité humaine de manière directe, comme l'urbanisation, les coupes forestières, ou la rotation des cultures, ou de manière indirecte, notamment à travers les effets de la pollution. Les changements sont de différents types, d'origines et de durées variées. Nous pouvons, à titre d'exemple, distinguer les familles d'applications suivantes :

- le suivi du plan d'occupation des sols, notamment pour des applications en géographie (urbanisation, déforestation, politique agricole);
- la détection des changements saisonniers de végétation, pour des applications en agronomie;
- la gestion des ressources naturelles, notamment le suivi des opérations d'afforestation, de reforestation ou de déforestation dans le cadre des protocoles internationaux (par exemple, le Protocole de Kyoto);
- la cartographie des dommages, qu'ils soient dus aux catastrophes naturelles ou d'origine anthropique.

La détection de changements repose essentiellement sur la capacité à mesurer les aspects temporels des phénomènes en utilisant des données multitemporelles bien choisies. Outre son coût élevé, l'interprétation visuelle demeure subjective ce qui incite au développement de techniques de détection automatique, même s'il s'agit d'une tâche difficile (Coppin *et al.*, 2004). La détection des zones de changements dans des paires d'images d'un même territoire prise à différentes dates consiste à identifier l'ensemble des pixels qui diffèrent significativement entre deux instants ou deux périodes données. Le problème est généralement formulé de la manière suivante : à partir de deux images h1 et h2 acquises à deux instants t1 et t2 différents, l'objectif est de générer une image représentant les zones de changements/non-changement entre h1 et h2, c'est-à-dire une carte des changements. Le problème de la détection de changements est souvent décomposé en deux étapes :

- l'élaboration d'un critère ou d'une mesure permettant de faciliter la discrimination des changements, c'est-à-dire de mettre en exergue les changements survenus entre les deux périodes considérées;
- l'identification des changements de manière à obtenir une partition de la scène observée en zones de changements et de non-changement (prise de décision).

Le choix de la variable image (canal brut ou combinaison de canaux tel que les indices de végétations) révélant adéquatement les changements apparus entre les deux

instants ou périodes d'observation est donc un point clef pour la qualité de la détection. L'utilisation des images originales n'est, en effet, pas la seule solution possible. Par exemple, certains types d'images peuvent être très sensibles aux conditions d'acquisition : dans le cas des images optiques, l'information radiométrique est très sensible aux conditions d'illumination et à l'angle de visée. La comparaison d'images transformées peut alors s'avère plus utiles.

3.2 Taxonomie des principales méthodes de détection de changements

Dans la section suivante, nous présentons un état de l'art synthétique sur la détection de changements par télédétection. L'objectif n'est pas, ici, de dresser une liste exhaustive des méthodes de détection de changements proposées dans la littérature depuis plusieurs décennies, mais plutôt de mettre en avant différentes stratégies pour réaliser la détection. Les articles d'état de l'art de Singh (1989), Mas (2000), Jensen et Cowen (1997), Lu *et al.* (2004), ou Coppin *et al.* (2004) proposent des revues plus complètes des approches existantes de détection de changements en télédétection. Notons que les catégories utilisées pour classifier les méthodes de détection diffèrent d'un article à l'autre. En particulier Coppin *et al.* (2004) proposent une taxonomie distinguant le cas bidates ou bitemporelles et multidates ou multitemporelles. La détection de changements réalisée uniquement entre deux images acquises à deux instants différents, du cas multidates, couramment appelé «temporal trajectory » dont l'objectif est de réaliser le suivi d'une scène à partir d'une série d'observations sur une longue durée[4] (évolution des cultures, du tissu urbain, etc.). En général, les méthodes bitemporelles sont plutôt employées pour l'analyse des changements abrupts, à une échelle locale, et exploitent des données à haute résolution spatiale. A l'inverse, les méthodes multitemporelles, plutôt centrées sur l'analyse des évolutions lentes ou des phénomènes à grande échelle, reposent sur l'analyse des profils d'évolution à haute fréquence temporelle dérivés de séries d'images acquises par des capteurs à basse résolution spatiale et haute répétitivité temporelle. Pour l'analyse de l'évolution de la végétation et des

[4] Notons qu'une approche est également qualifiée de bidate lorsqu'elle est basée sur l'utilisation de deux séquences d'images acquises sur deux intervalles de temps donnés

attributs de surface à une échelle régionale ou nationale voire globale, des outils de détection capables d'exploiter l'information multitemporelle sont nécessaires. Cependant, la résolution spatiale des capteurs à haute fréquence temporelle est un facteur très limitant pour le type de changements observables. Par ailleurs, Coppin *et al.* (2004) identifient, dans le cas bitemporels, neuf grands types de méthodes : la comparaison postclassification, l'analyse conjointe, les opérations de différence et de rapport d'images, les transformations linéaires, l'analyse de vecteurs de changements, la régression, l'analyse multitemporelle de mélange spectral, l'analyse multidimensionnelle de l'espace temporel et les méthodes hybrides plus marginales. Dans un cadre plus général, Radke *et al.* (2005) présentent une revue très complète des principales méthodes de détection de changements, aussi bien à partir d'images satellites que d'images beaucoup plus proches dans le temps, issues par exemple de séquences vidéo.

3.3 Méthodes utilisées pour la détection des dommages causés par des insectes

Dans cette partie du chapitre, nous résumons quelques études déjà réalisées pour la détection de changements causés par le dommage des insectes dans un milieu forestier en utilisant deux images d'un même capteur et aussi en mode multitemporel.

3.3.1 Études basées sur des images d'un même capteur

Wastensson *et al.* (1988) ont suivi, chez huit types de peuplements d'épicéas, un dépérissement de 20 à 40 % sur une image LANDSAT 5 TM prise dans une forêt d'épicéas en Suède. Ils n'ont pourtant constaté aucune relation permettant d'expliquer le degré de dommage. D'après eux, la variabilité en termes de peuplement, de relief et de phénologie a réduit la possibilité de rapprochement des données spatiales de haute résolution à celles du stress des forêts.

Dans une région de Caroline du Nord, Khorram *et al.* (1990) ont calculé le coefficient de détermination (R^2 = 0,85) d'une relation linéaire entre le pourcentage de dommages et deux variables explicatives, soit les valeurs de réflectance de la bande TM4 et l'altitude. Avec les mêmes données, dans une région semblable, Brockhaus *et al.* (1992) ont déduit que l'adjonction à TM4 de l'altitude comme seconde variable explicative permet d'augmenter le coefficient de détermination de 0,65 à 0,85. Dans cette étude, les auteurs ont également vérifié cette relation linéaire avec le canal PIR d'une image SPOT 3 HRV. Les résultats obtenus se ressemblent, mais avec un coefficient de détermination légèrement inférieur. Les auteurs ont supposé que l'existence d'une végétation herbacée avec un faible pouvoir de réflectance constitue un facteur important qui cause la réduction du NIR des arbres fortement défoliés en milieu ouvert. Toutefois, ils ont ajouté que, malgré le bon coefficient de corrélation obtenu, il n'est pas possible d'isoler de façon très précise les zones défoliées sur une image LANDSAT 5 TM à cause des changements spectraux dus à la composition du couvert forestier.

En utilisant des images de haute résolution, Adams *et al.* (1995), Radeloff *et al.* (1999) et Souza *et al.* (2003) ont utilisé une technique de « mélange spectral » (*mixture analysis*). Cette méthode consiste à séparer la signature spectrale de pins gris (*Pinus banksiana*) défoliés par la tordeuse du pin (*Choristoneura pinus pinus*) de celle des arbres non défoliés. Par la suite, l'on a considéré la valeur du pixel comme étant la somme des réflectances des différents éléments naturels qui le composent. Ajoutons à cela une classe spectrale théorique en fonction de la proportion de chacun de ces éléments. Le taux d'infestation a été estimé en examinant la différence entre les valeurs spectrales réelles et théoriques mesurées pour chaque pixel. Les auteurs ont constaté que la réflectance dans le proche infrarouge est élevée dans les zones défoliées d'une image de 1993 par rapport à celle mesurée sur une image de 1987 où l'on note une absence de dommage. En contrepartie, dans l'image de 1993, le proche infrarouge est négativement corrélé (R variant de -0,47 à -0,69) au taux d'infestation. Les auteurs ont expliqué cet accroissement entre les deux dates au nombre élevé de feuillus visibles en 1993 qui engendrent une plus grande réflectance dans le proche infrarouge que les conifères. Pour diminuer la variabilité spectrale, les auteurs ont employé

une méthode de stratification et sont alors parvenus à un coefficient de corrélation de -0,94 entre le niveau de dommages et le proche infrarouge dans le cas de peuplements purs de pins gris.

Après observation du degré de dommages dans une forêt de conifères au Vermont, dans le nord-est des États-Unis, Vogelmann *et al.* (1988) ont constaté qu'il existe une corrélation très significative entre le niveau de dommages et deux indices de végétation, soit le TM7/TM4 et le TM5/TM4 (R^2 = 0,92). Ils ont conclu que la production de biomasse, la teneur en cau et le degré de dommages sont fortement liés. Dans la même région, et en utilisant les mêmes images LANDSAT TM, Vogelmann (1990) a comparé deux indices de végétation, soit l'indice de différence de végétation (NDVI) et le rapport SWIR/NIR. Les résultats obtenus ont montré que le NDVI est mieux adapté pour les forêts feuillues que les résineux tandis que le rapport SWIR/NIR est plus adéquat pour les deux types. Vogelmann a conclu que la faible réflectance dans le rouge des conifères est à l'origine du fait que le NDVI n'est pas bien adapté.

En se servant d'une image LANDSAT 5 TM dans des forêts suédoises, Ekstrand (1994) a calculé la possibilité de mieux distinguer différentes classes de dépérissement d'épinettes. Il a testé une stratification qui consiste à différencier et séparer la variance de la réflectance due aux divers couverts forestiers. Après avoir supprimé, premièrement, les épinettes qui ont l'âge approximatif de 70 ans et, deuxièmement, les peuplements très denses et très dispersés, Ekstrand (1996) est arrivé à caractériser, à l'aide de la bande TM4, deux classes de dommages (≤25 % et >25 %) avec une précision générale de classification de 85 % en terrain plat, et de 75 % en terrain accidenté.

En Suède, dans les forêts de pins sylvestres (*Pinus sylvestris)* et d'épicéas, Falkenström *et al.* (2002) ont employé la même méthode sur une image IRS-1C pour déterminer le niveau de dommages en fonction des valeurs spectrales. En se servant d'un modèle qui leur permet d'uniformiser le changement de la réflectance dû à la proportion d'essences forestières, ils ont observé une corrélation significative entre le proche infrarouge

(PIR) et le niveau de dommages (R passant de -0,19 à -0,83) pour des peuplements d'épicéas dont le recouvrement est au moins de 60 %. En contrepartie, ce modèle de normalisation du couvert forestier ne leur a pas permis d'améliorer la corrélation. Finalement, ils sont arrivés à la conclusion que pour mieux détecter le degré de dommages dans les forêts d'épicéas en utilisant des images satellitaires à haute résolution, le recouvrement des peuplements forestiers doit dépasser 60 %, la pente doit être inférieure à 15 % et le taux de perte d'aiguilles doit être supérieur à 20 %.

Dans une région défoliée, et à l'aide d'images multispectrales, Leckie (1996) a employé un système de détection et de cartographie automatisée. Cette méthode consiste à déterminer les pixels dont les valeurs spectrales montrent une décoloration des feuilles, ce qui permettra de localiser les endroits où une infestation de la tordeuse est en cours. Selon Leckie, trois ou quatre sites bien déterminés sont nécessaires pour classer les différents niveaux d'infestation. Leckie a ajouté que les images prises doivent avoir de deux à quatre mètres de résolution. Le résultat obtenu est une image contenant six bandes spectrales. Les couleurs indiquent la forêt en santé (vert pâle) et la gravité de l'infestation (jaune : légère; orange : modérée; rouge : grave). Le vert foncé indique les conifères autres que le pin gris (voir Figure 3.1).

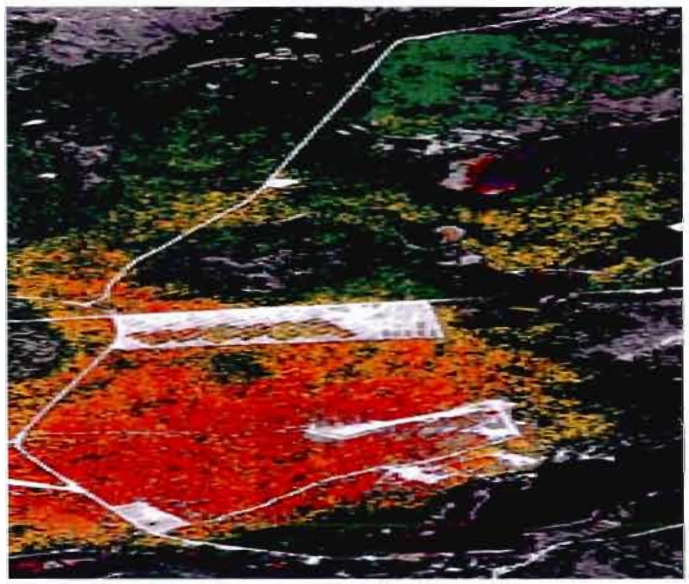

Figure 3.1 Image multispectrale classifiée de pins gris infestés par la tordeuse de pin gris.
Source : Bulletin Info Forêt, avril 2006.

Pour analyser les épidémies de la tordeuse de pin gris, dans l'est de l'Ontario, Leckie (1996) a employé une méthode qui consiste à associer des images de haute résolution et des données de terrain dans le but de localiser et d'estimer la décoloration du feuillage des conifères à l'échelle d'une forêt. Selon lui, cette technique de classification spectrale est exacte à 84 % et a permis de fournir une information géographique de meilleure qualité et plus fiable. Mais son application doit être réservée aux peuplements forestiers de pins gris défoliés.

3.3.2 Études basées sur des images multitemporelles

À l'aide des images multitemporelles LANDSAT 5 TM, Skakun *et al.* (2003) ont étudié les dégâts causés par le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*) dans les forêts de pins tordus (*Pinus contorta*). Pour comparer les images entre elles, ils ont employé un indice d'humidité (*wetness index*) inventé à partir d'une transformation appelée

« Tasseled Cap » [0,1446 (TM1) + 0,01761 (TM2) + 0,332 (TM3) + 0,3396 (TM4) – 0,6210 (TM5) – 0,4186 (TM7)]. Après cette transformation, ils ont pu définir trois classes représentant différents niveaux de dommages et une classe regroupant les arbres coupés ou abattus. Les pixels de l'image sont donc classés selon l'importance du changement des valeurs de l'indice d'une année à l'autre. Les résultats finaux de cette technique ont été élaborés d'après la vérité terrain dans laquelle l'unité minimale de détection a été délimitée à 10-29 arbres attaqués pour 0,25 ha.

Pour localiser les zones de dépérissement dans les forêts de conifères en Allemagne, Boresjö (1993) a utilisé des images multidates de LANDSAT MSS. Il a conclu que pour faire de telles études, il faut absolument avoir des images prises à la même date et à la même période de l'année pour réduire, d'une part, les variations phénologiques et, d'autre part, les effets d'ombre créés par l'inclinaison du soleil. Boresjö (1993) a aussi constaté une réduction du ratio PIR/Rouge avec l'augmentation du degré de dommages des arbres.

Vogelmann (1988) s'est servi de deux images LANDSAT MSS de 1973 et 1984 d'une région du nord-est des États-Unis. Il a ainsi constaté entre les deux dates une réduction significative du proche infrarouge dans les peuplements gravement défoliés de pins rouges.

Afin de suivre le degré de dommages dans les peuplements d'épicéas, Hagner et Rigina (1998) ont eu recours à une régression linéaire pour calculer l'évolution de la réflectance entre 1978 et 1992. Les résultats obtenus sont très significatifs avec une réduction du proche infrarouge ($R^2 = 0,92$) et une augmentation du rouge ($R^2 = 0,93$) en fonction du degré de dommage. Les auteurs ont conclu que les résultats obtenus sont dus à plusieurs facteurs parmi lesquels la vitalité des arbres, l'ombre entre les arbres, la réflectance forte dans le PIR d'un ensemble de végétation, et l'accroissement du pourcentage d'aiguilles mortes, d'écorce et de sols nus visibles.

Dans une zone forestière de Fort St. James, en Colombie-Britannique, où les peuplements forestiers de pins tordus matures (*Pinus contorta*) ont été attaqués par le

dendroctone du pin ponderosa (*Dentroctonus ponderosa*), Franklin (2003) et Wulder, Skakun et Carroll (2003) ont élaboré une classification pour identifier les dégâts causés par cet insecte au stade rouge (dommages graves). Cette classification a été réalisée grâce aux images LANDSAT 5 TM de 1999, aux données de point d'observation sur le terrain, et aux données de l'inventaire forestier. Les écarts observés dans la réponse spectrale des levés effectués dans les images et sur le terrain ont été réduits en stratifiant les images obtenues avec les données de l'inventaire forestier c'est ainsi que les arbres gravement infestés ont été retirés. En se basant sur les endroits connus d'infestation de l'insecte, un algorithme de maximum de vraisemblance a été appliqué. La précision générale de la classification des dommages qui était basée sur l'étude de 360 points de validation indépendants était de 73 %. Les auteurs ont ajouté que le taux de précision sera plus important et les produits cartographiques peuvent être utiles, si l'on limite la variabilité locale des peuplements infestés avant la détermination de la signature spectrale (voir Figure 3.2).

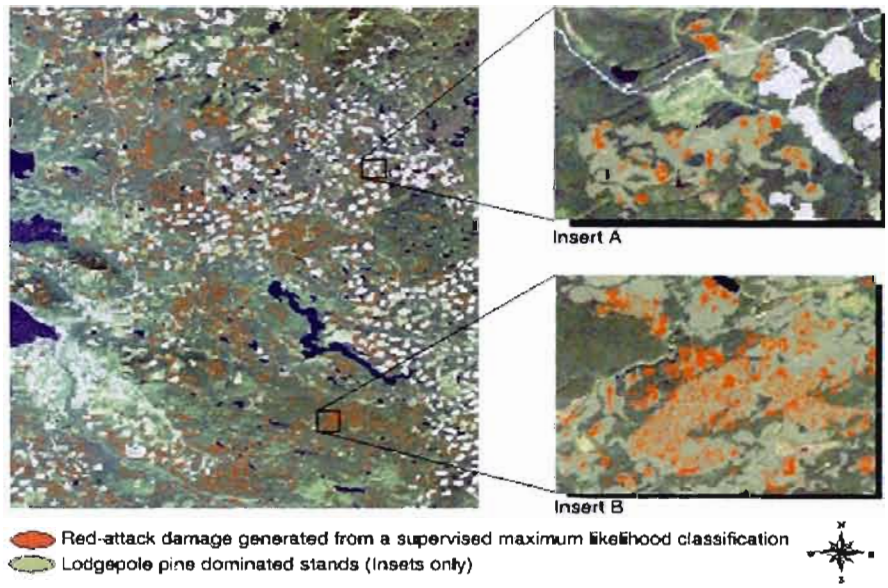

Figure 3.2 Peuplements infestés par le dendroctone du pin ponderosa
Source : Franklin *et al.* (2003).

L'image (fig. 3.2) ci-dessus présente une carte de peuplements forestiers gravement infestés. Les deux petites fenêtres montrent la nature éparse des dommages au stade rouge à

l'intérieur des polygones représentant les peuplements. Les polygones où l'on retrouve plusieurs petites taches représentent les peuplements où le dendroctone du pin ponderosa se retrouve en grand nombre (fenêtre A). Certaines taches relativement grandes et homogènes témoignent de zones à fortes infestations (fenêtre B), Franklin. S *et al.* (2003).

Skakun, Franklin et Wulder (2003) ont par ailleurs utilisé des images ETM+ de LANDSAT 7 prises dans les années 1999, 2000 et 2001, dans une forêt de pins tordus (Pinus contorta) infestés par le dendroctone du pin ponderosa (Dentroctonus ponderosa Hopkins) de la région forestière de Prince George en Colombie-Britannique. Après avoir appliqué à ces images des corrections géométriques et atmosphériques, ils ont calculé un indice différentiel amélioré d'hydratation superficielle (EWDI). Pour ce faire, ils ont fait appel à une transformation Kauth-Thomas. Par la suite, la procédure a consisté à soustraire des pixels, à améliorer la qualité et à effectuer le seuillage des différences observées entre les indices d'hydratation superficielle. L'indice EWDI résultant de cette technique a permis l'interprétation des particularités spectrales des peuplements gravement défoliés à l'aide des données de terrain de l'année 2001. Ces particularités spectrales ont été comparées aux réflectances détectées sur des images de composite couleur. Les données des zones gravement infestées, capturées à l'aide d'un levé aérien, ont été réunies en deux couches; ensuite, les auteurs ont appliqué l'EWDI pour différencier les classes infestées (groupements de 10 à 29 arbres et de 30 à 50 arbres) par le dendroctone du pin ponderosa grâce à un échantillon d'une forêt saine. Les résultats de la classification basée sur l'EWDI variaient entre 67 % et 78 %.

Lambert *et al.* (1995) ont suivi l'évolution du dépérissement dans une forêt d'épinettes en République tchèque (Europe). En utilisant des images LANDSAT 5 TM, ils ont constaté une légère augmentation de la réflectance dans TM4 entre les arbres moyennement et gravement défoliés. C'est dans l'infrarouge moyen (TM5 et TM7) qu'ils ont noté une corrélation importante. Ils arrivent à expliquer 83 % de la variance observée au niveau des zones légèrement et moyennement malades à l'aide des bandes TM1 (bleu), TM4 et TM7. Ils en sont arrivés à la conclusion que c'est la bande TM3 (rouge) qui dissocie et explicite ($R^2 = 0,88$) les classes moyennement et gravement malades. Selon eux, les ratios des

bandes ne sont pas appropriés dans ce cas-là. En se servant d'une régression logistique, ils ont atteint une précision de classification de 71 à 75 % de ces trois degrés de dommages (léger, modéré et grave). Par un système de classification neuronale, Ardö (1998) a utilisé des données similaires et il est parvenu à une précision de 63 %; toutefois, lorsqu'il a utilisé deux images LANDSAT 5 TM, la précision a augmenté pour atteindre 77-78 %. Il a ajouté la topographie comme variable indépendante, mais celle-ci n'a pas amélioré la précision de classification.

3.4 Choix des méthodes de détection des changements

Dans l'ensemble, toutes ces études démontrent que la télédétection spatiale à haute résolution peut être un moyen utile à cartographie des peuplements infestés, avec une précision de détection de l'ordre de 70-80 %. Toutefois, celle-ci dépendra fortement de la variabilité des éléments du milieu, des données auxiliaires dont dispose l'analyste, du degré de dommages et de l'aire minimum de dépérissement que l'on veut détecter.

Nos choix méthodologiques présentés dans la prochaine section s'alignent sur les approches et les bandes spectrales parmi les plus employés dans les études que nous avons ici passées en revue.

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE

4.1 Description de la zone d'étude

4.1.1 Description générale

L'Île d'Anticosti est située dans le golfe du Saint-Laurent, au Québec; elle s'étend sur une longueur de 220 km et sur une largeur maximale de 56 km, couvrant ainsi une superficie de 7943 km^2 (voir Figure 4.1).

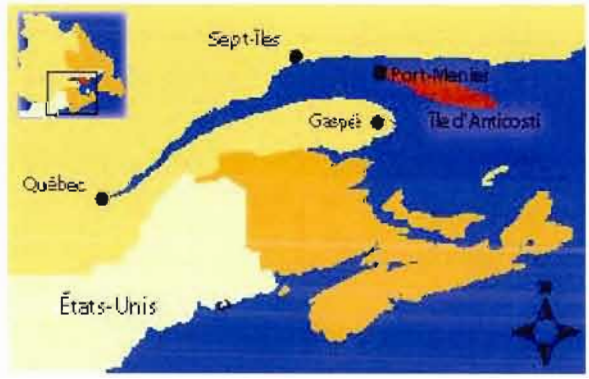

Figure 4.1 Localisation de l'Île d'Anticosti.

Sa topographie est peu accidentée et son altitude moyenne n'atteint que 126 m. Le climat maritime de cette île lui confère des étés tempérés et des hivers longs, bien que relativement doux (Huot, 1982). La température moyenne est d'environ -10°C en janvier et

15°C en juillet. Les précipitations de neige sont abondantes : elles dépassent généralement 300 cm dans les parties ouest et centrale de l'île (Environnement Canada, 2009).

4.1.2 La végétation

La forêt de cette île appartient à la section Anticosti de la région boréale et au domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'est du cadre bioclimatique québécois (Grondin *et al.*, 1996). Le sapin baumier est généralement l'espèce dominante (Huot, 1978). L'épinette blanche (*Picea glauca*) et l'épinette noire (*Picea mariana*) sont abondantes alors que le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) sont présents de façon sporadique (Huot, 1978; Potvin, 1992). Dans l'est de l'île, la forêt est entourée de grandes tourbières. La présence du cerf de Virginie a modifié la flore indigène de l'île; cela a débuté par les strates herbacées et arbustives (Potvin *et al.*, 2000).

Les principales perturbations naturelles sont les épidémies d'insectes, le feu et le chablis. Au cours des dernières années, la superficie des sapinières a grandement diminué sous l'effet combiné du broutement des semis par le cerf de Virginie et des épidémies d'arpenteuse de la pruche (*Lambdina fiscellaria*) et de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) (Tremblay, 2005).

4.1.3 L'épidémie de la TBE sur l'Île d'Anticosti

Comme cela a été mentionné au chapitre I, cette étude porte spécifiquement sur la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE). L'épidémie de cet insecte est notable dans plusieurs régions du Québec, quoique à des niveaux variables. En Outaouais, région où la recrudescence de la tordeuse des bourgeons de l'épinette a débuté en 1992, les survols aériens de 2008 montrent une diminution de l'étendue et de l'intensité des dommages par rapport à 2007. En Abitibi-Témiscamingue, les superficies défoliées restent stables bien que l'on observe une augmentation de l'intensité des dommages. En Mauricie et dans les Laurentides,

les superficies défoliées et les dommages augmentent légèrement. Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, sur la Côte-Nord, de même que sur l'Île d'Anticosti, on voit une hausse importante des superficies affectées et de l'intensité des dommages (MRNF, 2008; voir Figure 4.1). Sur la Côte-Nord et l'Île d'Anticosti, le rapport du MRNF de l'année 2008 indique une aire défoliée de 35 865 ha. Ce sont surtout des sapins qui sont défoliés, parfois en conjonction avec des essences feuillues ou des épinettes noires. Certains peuplements sont relativement jeunes, d'autres ont atteint leur maturité. D'une façon générale, la majorité des aires défoliées est principalement composée d'épinettes blanches, parfois associées avec le sapin baumier (Figure 4.2).

En 2006, cet insecte avait globalement ravagé 50 000 ha de forêts québécoises. En 2007, 110 700 ha auraient été infestés, soit le double de l'année précédente; en 2008, 134 116 ha défoliés ont été comptabilisés (voir Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Superficie des zones (en hectares) infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec depuis 1967

Année	Niveaux de défoliation				Total (ha)
	Légère	Modérée	Grave	Mortalité	
1967	nd	nd	nd	_	1 044
1968	84 126	42 565	24 710	_	151 401
1969	576 799	187 370	39 335	_	803 504
1970	826 658	605 403	990 109	_	2 422 170
1971	1 891 526	1 713 954	1 670 849	_	5 276 329
1972	2 353 095	1 975 470	5 972 915	79 650	10 381 130
1973	3 641 628	3 244 917	3 183 166	248 285	10 317 996
1974	9 356 464	6 881 257	13 359 561	1 145 565	30 742 847
1975	4 192 312	6 117 471	21 990 939	3 020 984	35 321 706
1976	9 944 667	3 746 879	15 643 670	3 814 319	33 149 535
1977	5 489 019	4 844 260	16 783 188	5 672 386	32 788 853
1978	3 054 757	2 852 660	10 350 379	6 296 423	22 554 219
1979	560 137	996 703	3 754 270	8 290 141	13 601 251
1980	1 031 249	918 146	4 272 887	9 254 931	15 477 213
1981	632 350	1 920 101	4 382 827	10 164 410	17 099 688
1982	1 061 729	1 206 101	7 580 676	11 190 109	9 848 506
1983	946 260	1 796 548	10 469 068	11 964 783	13 211 876
1984	3 903 969	2 446 611	4 692 658	12 633 425	11 043 238
1985	2 968 839	814 249	5 476 728	12 863 014	9 259 816
1986	751 744	1 351 770	728 433	nd	2 831 947
1987	301 872	353 914	385 868	nd	1 041 654
1988	274 025	168 818	265 304	nd	708 147
1989	192 443	216 687	515 714	nd	924 844
1990	384 236	310 502	561 352	nd	1 256 090
1991	204 020	192 570	98 293	nd	494 883
1992	25 545	16 632	4 101	nd	46 278
1993	103	172	202	nd	477
1994	936	1 148	828	nd	2 912
1995	320	682	3 701	nd	4 703
1996	663	793	3 778	nd	5 234
1997	800	815	3 547	nd	5 162
1998	1 205	2 249	7 248	nd	10 702
1999	2 632	3 838	16 496	nd	22 966
2000	2 681	1 828	6 211	nd	10 720
2001	677	2 491	15 734	nd	18 902
2002	1 678	1 081	2 063	nd	4 822
2003	380	873	1 388	nd	2 641
2004	2 848	4 445	26 450	nd	33 743
2005	3 662	11 902	27 701	nd	43 265
2006	10 811	14 429	25 258	nd	50 498
2007	33 168	35 341	42 234	nd	110 743
2008	27 573	49 872	56 671	nd	134 116

Source : Aires défoliées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (MRNF, 2008).

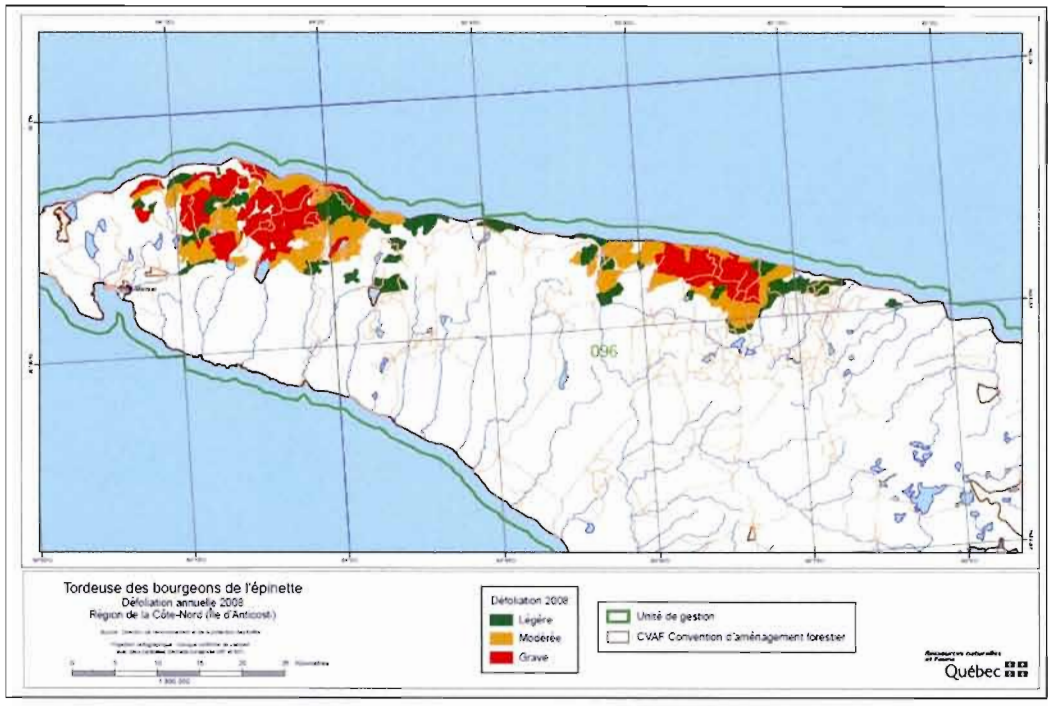

Figure 4.2 Dommages de la tordeuse des bourgeons de l'épinette de l'Île d'Anticosti en 2008.
Source : Aires défoliées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (MRNF, 2008).

4.2 Données utilisées

4.2.1 Données images

Pour des fins expérimentales, nous avons choisi trois images : deux images issues d'un même capteur LANDSAT 2006 et 2007 (comme témoin) et une image SPOT 2007. Le choix des années ne s'est pas fait au hasard, mais suivant les dommages de la TBE et la disponibilité des données. Il est important de signaler que cela s'est révélé relativement difficile de trouver trois images prises à la même date – la période pendant laquelle les aiguilles des arbres prennent une couleur rougeâtre (montrant les dommages de la TBE), soit la mi-juillet – à des années différentes, et qui remplissent les conditions idéales de visualisation (absence de nuages) de l'Île d'Anticosti. Cependant, compte tenu de la

compatibilité spectrale des capteurs exposée dans la section 2.4, nous avons décidé d'analyser deux images LANDSAT 5 TM et une image SPOT 5 de l'Île d'Anticosti (voir Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Liste des images retenues

Capteurs	Date de l'image	Résolution
LANDSAT 5 TM	13 juillet 2006	30 m
LANDSAT 5 TM	16 juillet 2007	30 m
SPOT 5	13 juillet 2007	10 m

4.2.2 Données de référence

Aux fins de référence sur les dommages de la TBE, nous avons utilisé les données du MRNF obtenues à l'aide des observations aériennes (durant les étés 2007 et 2008) des dégâts de la TBE sur une partie de l'Île d'Anticosti.

Nous avons nous-mêmes participé avec les techniciens du MRNF à un survol aérien, durant la période allant du 24 au 27 juillet 2008, d'une partie de l'Île d'Anticosti à bord d'un avion spécialisé doté d'un GPS. Nous avons ainsi directement observé les dégâts causés par la TBE, et cela nous a permis d'acquérir une connaissance directe des méthodes de levés aériens.

Pour localiser et caractériser les aires affectées, nous avons utilisé une tablette électronique directement liée au GPS de l'avion. À l'aide du logiciel PC Mapper, qui montrait en arrière-plan l'image LANDSAT 5 TM du 18 juillet 2008, nous avons pu établir la correspondance en temps réel entre le terrain et l'image affichée sur la tablette. Les techniciens du MRNF ont classifié durant le survol les dégâts selon leur intensité (légère, modérée et grave) et ils les ont cartographiés au fur et à mesure sur la tablette. Après traitement et validation des observations, des polygones de la zone défoliée ont été produits (voir Figure 4.3).

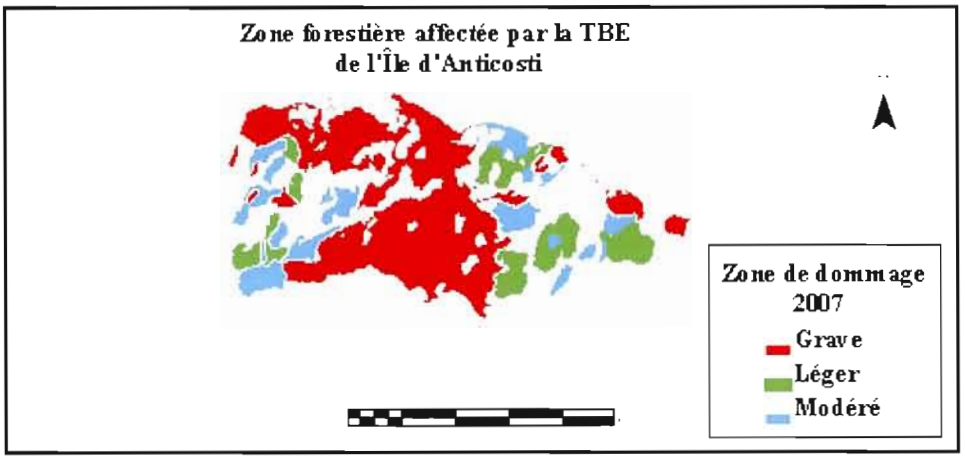

Figure 4.3 Zone de dommages de la tordeuse des bourgeons de l'épinette de l'Île d'Anticosti d'après les observations aériennes (juillet 2007).

Notons que les données de l'année 2007 ont été acquises de la même façon et que ce sont celles-ci qui ont été utilisées dans notre recherche. Précisons également qu'il n'y a pas eu de survol aérien de l'Île d'Anticosti en 2006.

4.3 Prétraitement des données

Avant d'appliquer une méthode de détection de changements, il est essentiel de pouvoir s'assurer qu'une comparaison est possible entre les images concernées et ce, tant au niveau géographique (les images doivent parfaitement se superposer) qu'au niveau de la qualité radiométrique des images (les observations doivent avoir été faites dans des conditions similaires d'éclairement). En particulier, les images utilisées dans le cadre d'une analyse multitemporelle sont souvent acquises dans des conditions différentes, notamment concernant l'atmosphère, ce qui implique des variations de radiance. Des changements de radiométrie dus à la présence de nuages fins et à leurs ombres surviennent aussi fréquemment; sans rapport avec les changements qui nous intéressent, ils risquent toutefois d'être perçus comme tels en l'absence d'un prétraitement adéquat. Il est donc essentiel de

corriger la géométrie et la radiométrie des images préalablement à leur analyse. Dans notre étude, nous avons suivi les étapes mentionnées dans la figure 4.4.

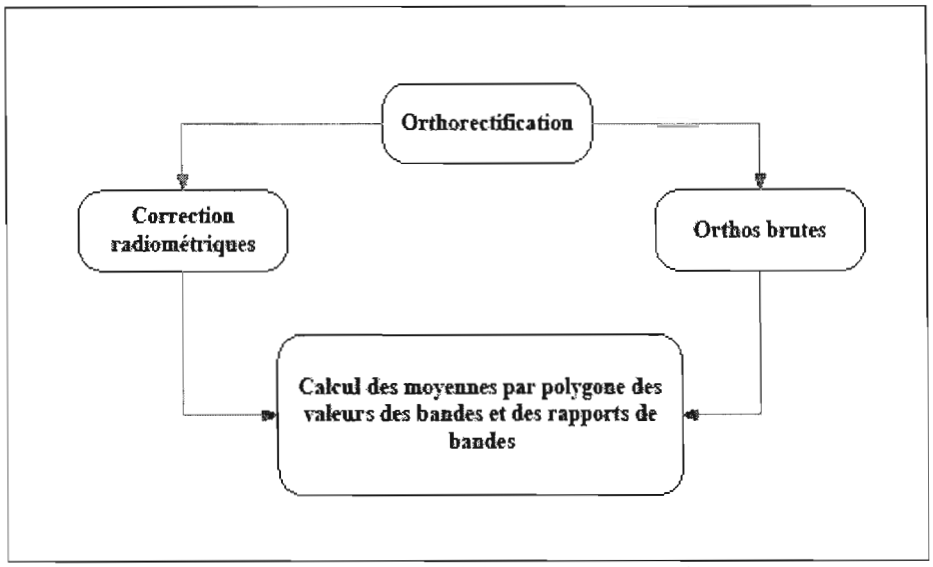

Figure 4.4 Schéma méthodologique des prétraitements.

4.3.1 Correction géométrique des images

Des corrections géométriques ont été effectuées à l'aide du logiciel PCI Geomatica. Nous avons procédé à l'orthorectification des images en utilisant pour chacune d'entre elles les mêmes points de calage et la même méthode.

Le MNA (Modèle Numérique d'Altitude) employé dans la correction géométrique a été créé d'après les courbes de niveau des feuillets 1 : 20000 du MRNF et ce, à l'aide du logiciel PCI dans le module OrthoEngine. Les paramètres du projet OrthoEngine sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Les étapes de la création du MNA

Information du projet	Math Modelling Method : Satellite Orbital Modelling Options : Toutin's Model
Définition de la projection	UTM 20 D-04
Configuration du traitement	Import Build Dem
Importer le fichier vecteur	Courbe de niveau de l'Île d'Anticosti Data type : Contours Élévation source : Z Max
Paramètre de sortie du MNA	La taille du pixel : 10 m La projection : UTM 20 D-04 Les valeurs de l'itération : 10\1

Afin de permettre de mieux superposer les trois images, l'exactitude géométrique est très importante pour la détection des changements. En effet, Dai et Khorram (1998) ont indiqué qu'on devrait obtenir moins de 0,2 pixel d'erreur géométrique pour détecter 90 % des vrais changements. Par contre, Khorram *et al.* (1999) ont recommandé 0,5 pixel de précision à cet effet.

L'image LANDSAT du 16 juillet 2007 a d'abord été géométriquement corrigée par la méthode d'image à image en utilisant comme référence une orthoimage SPOT 5 du Conseil canadien de géomatique GéoBase (CCOG). La correction de l'image LANDSAT du 13 juillet 2006 a ensuite été effectuée à l'aide de la méthode d'image à image en s'appuyant sur l'image corrigée LANDSAT du 16 juillet 2007. L'orthorectification de l'image SPOT du 13 juillet 2007 a, quant à elle, été faite d'après l'orthoimage SPOT 5. Après plusieurs essais d'orthorectification, nous avons trouvé que le choix des points de calage automatique effectué par le logiciel PCI Geomatica donnait les meilleurs résultats quant à la superposition des trois images. L'erreur moyenne quadratique (RMS) obtenue est de l'ordre de 0,26 pixel. Ce résultat a été jugé très satisfaisant pour procéder à l'analyse multidate.

Enfin, pour comparer des images par superposition pixel à pixel, les trois images doivent avoir la même résolution. Comme la résolution de l'image SPOT 5 du 13 juillet 2007 était de 10 m alors que celle des images LANDSAT était de 30 m, nous avons dégradé la résolution spatiale pour obtenir en sortie une image SPOT à 30 m de résolution, soit une résolution comparable à celle des images LANDSAT. La procédure utilisée consista en un ré-échantillonnage par convolution cubique dans le projet OrthoEngine du logiciel PCI Geomatica.

4.3.2 Corrections radiométriques

4.3.2.1 Correction atmosphérique

Les corrections atmosphériques peuvent être utiles puisqu'elles aident à atténuer les effets liés aux angles d'incidence solaire et aux effets atmosphériques, lesquels changent les propriétés spectrales spécifiques des catégories d'occupation des terres sur l'image. Ces corrections ont aussi pour but de corriger certaines variations de la distribution des données causées par le décalage temporel dans l'acquisition des images. En effet, les facteurs comme l'angle d'élévation du Soleil, la distance Terre-Soleil, la calibration des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent la valeur numérique des pixels (Eckhardt *et al.*, 1990).

Les propriétés optiques de l'atmosphère varient considérablement dans le temps et dans l'espace. Elles dépendent du contenu de la vapeur d'eau et de la quantité d'aérosols. Le signal capté par le satellite est modifié, d'une part, par des phénomènes de diffusion, de réflexion et d'absorption et, d'autre part, par les rapports géométriques entre le satellite, la cible et le soleil (angles et azimuts). La réflectance mesurée par le satellite est donc différente de celle de la surface terrestre. Plusieurs auteurs ont développé des modèles de corrections atmosphériques pour prendre en compte ces différents paramètres (Tanré *et al.*, 1990 ; Rahman et Dedieu, 1994).

Dans notre cas, nous avons appliqué l'algorithme ATCOR 2 du logiciel PCI Geomatica. Les paramètres atmosphériques de correction de chaque image sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Les paramètres de la correction atmosphérique

Paramètres de corrections atmosphériques	L6	L7	S7
Altitude	ATCOR 2 hauteur: 200 m	ATCOR 2 hauteur: 200 m	ATCOR 2 hauteur: 200 m
Type de capteur	LANDSAT 4-5 TM	LANDSAT 4-5 TM	SPOT-5MS
Taille de pixel	30 m	30 m	30 m
Date	13 juillet 2006	16 juillet 2007	13 juillet 2007
Le fichier de calibration	Tm_standart.ca	Tm_standart.ca	SPOT5_test.ca
Informations atmosphériques	Rural	Rural	Rural
Les conditions atmosphériques	Eté-Mid-latitude	Eté-Mid-latitude	Eté-Mid-latitude
Visibilité (km)	15	15	15

Les conditions météorologiques aux dates de prise des images, c'est-à-dire l'humidité, la température et la visibilité, ont été observées à la station météorologique de Havre-St-Pierre, soit la station la plus proche de l'Île d'Anticosti (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 Les conditions météorologiques à la date de prise des images

Images	Conditions générales	Température (degrés Celsius)	Visibilité (km)	Humidité relative (%)
LANDSAT 13 juillet 2006	Ciel dégagé	19,5	15	60
LANDSAT 16 juillet 2007	Ciel dégagé	17,3	15	76
SPOT 13 juillet 2007	Ciel dégagé; quelques nuages	21	15	70

Source : Archives Environnement Canada (2008).

4.3.2.2 Correction des effets de lignage

Lorsque les détecteurs d'un capteur ne sont pas correctement calibrés, l'image de sortie affiche alors un effet indésirable de lignage; c'est ce que l'on a observé en rehaussant les deux images LANDSAT (Figure 4.5). L'algorithme DSTRIPE du logiciel PCI Geomatica a été utilisé pour minimiser cet effet. Toutefois, ce programme permet seulement d'atténuer les effets de lignage; il ne les enlève pas complètement (Horn *et al.*, 1979).

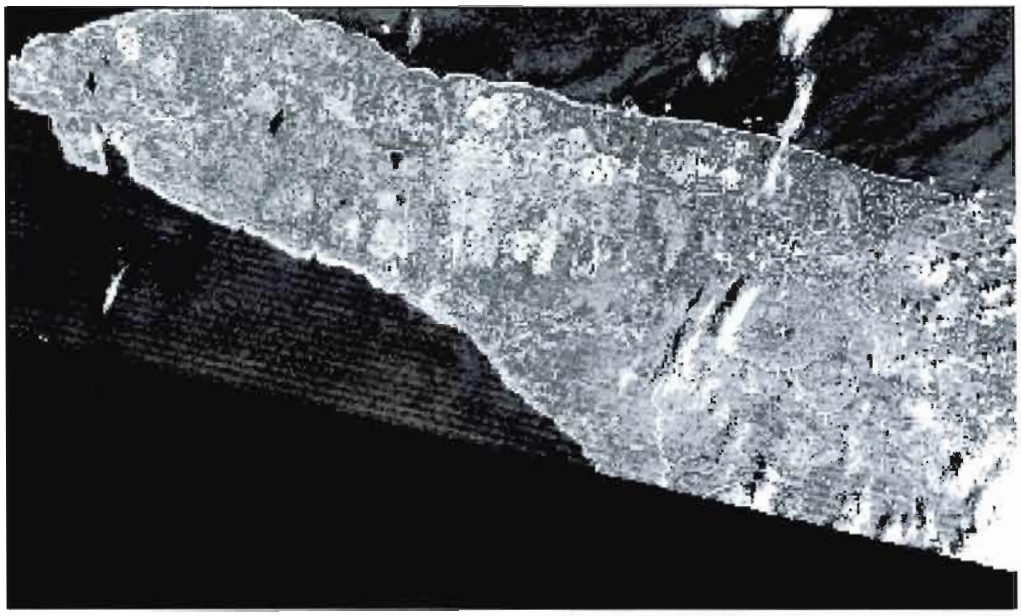

Figure 4.5 Les effets du lignage dans le canal rouge de LANDSAT 2007.

4.3.3 Découpage des secteurs d'études

Dans le but de comparer seulement les peuplements résineux concernés par les dommages de la TBE, nous avons procédé au masquage des nuages, des sols nus, des tourbières, des routes ou pistes, des parterres de coupes forestières et de la végétation herbacée. Pour ce faire, nous avons suivi le procédé présenté à la figure 4.6.

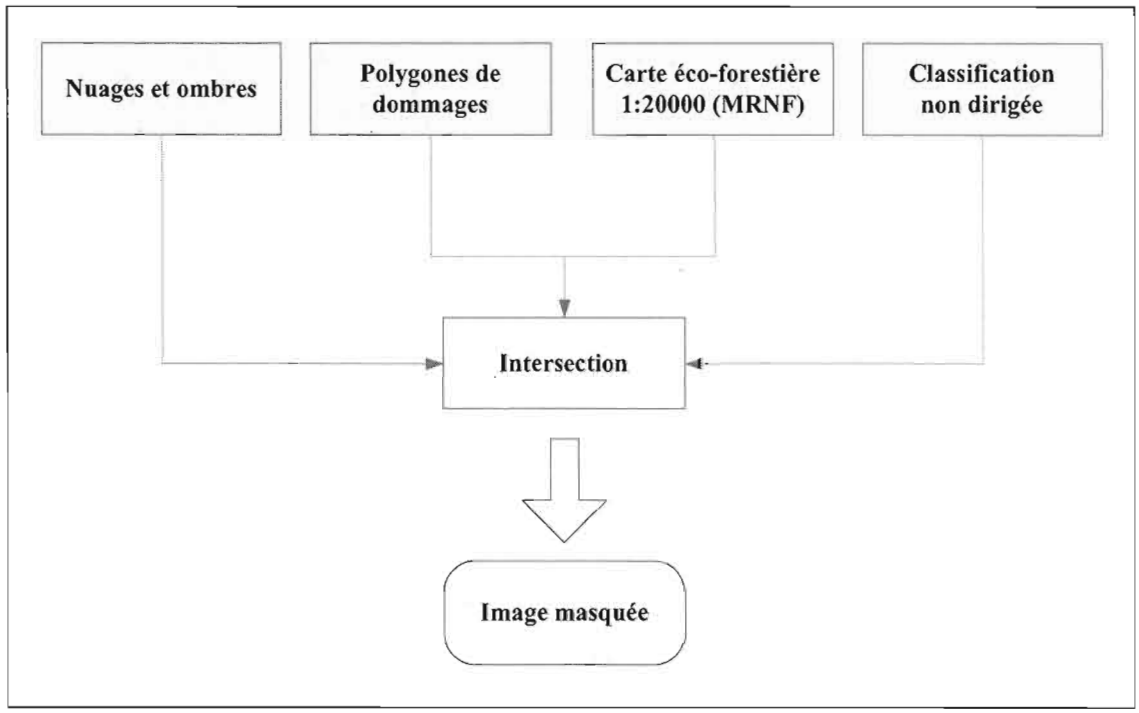

Figure 4.6 Les étapes de masquage des images.

Afin de découper la zone d'étude, nous avons utilisé les polygones de dommages déjà délimités par les techniciens du MRNF (art. 4.2.2), des cartes écoforestières de la région; finalement, nous avons appliqué une classification non dirigée à l'image LANDSAT du 13 juillet 2006 en vue de retirer les zones non forestières.

4.3.3.1 Masquage des nuages

Comme quelques nuages sont visibles sur l'image SPOT du 13 juillet 2007, nous avons procédé à leur masquage (ainsi qu'à celui des ombres) pour les éliminer complètement de notre zone d'étude. Ce masquage a été effectué manuellement en numérisant des polygones pour les nuages et les ombres. Notons qu'il n'y avait pas de nuages dans les images L6 et L7 (voir Figure 4.7).

Figure 4.7 Image SPOT 2007 après masquage des nuages.

4.3.3.2 Masquage des zones ne pouvant être affectées

Les polygones de dommages du MRNF comprennent des peuplements résineux, des sols nus, des tourbières, des parterres de coupes forestières, des zones de végétation herbacée et des chemins ou des routes (Figure 4.8).

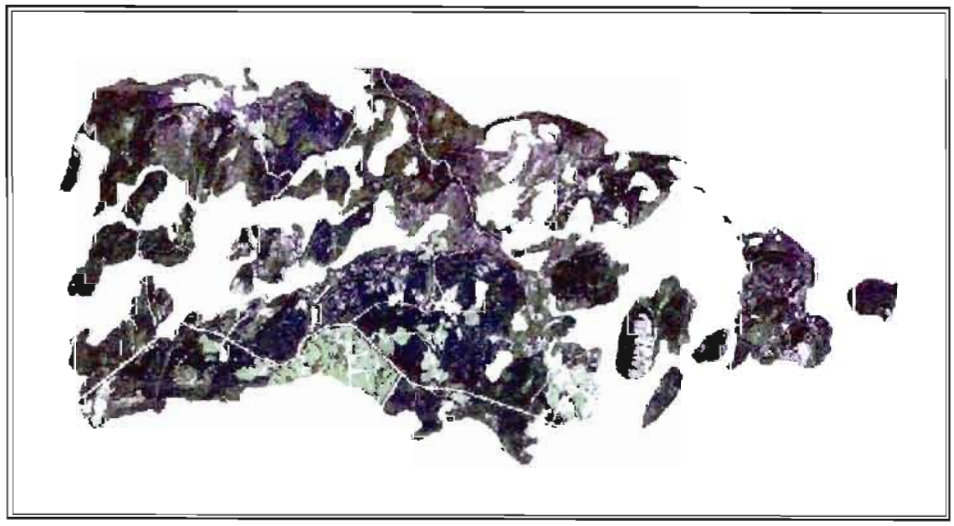

Figure 4.8 Image LANDSAT 2006 après le premier découpage.

Pour enlever toutes les zones ne pouvant être affectées par la TBE, nous avons d'abord appliqué une classification non dirigée à l'image LANDSAT du 13 juillet 2006 permettant d'identifier les peuplements forestiers que l'on doit étudier. Nous avons choisi l'image LANDSAT 2006 parce qu'elle présente des taux de dommages minimes ou nuls (voir Tableau 4.1).

La classification non dirigée est une méthode courante pour la cartographie de la couverture terrestre de grandes étendues d'après des données issues de satellites. Des regroupements sont générés au moyen d'un algorithme non dirigé, comme l'algorithme K-means, puis fusionnés et étiquetés par une combinaison de méthodes manuelles et automatisées. La classification produit un regroupement naturel des pixels de l'image que l'on nomme « regroupement spectral » ou « classe ». Ainsi, on présume que les régions de l'image ayant une même signature spectrale présentent un type similaire d'utilisation du sol. Ensuite, on doit déterminer l'identité de ces regroupements spectraux par une analyse de l'image et de données auxiliaires. Notre choix pour l'application de la classification non dirigée se justifie par les raisons suivantes :

- l'objectif de ne pas influencer les résultats par des choix de classes a priori;
- il s'agissait simplement d'exclure les zones non sujettes aux dommages et non d'établir une classification détaillée des utilisations du sol;
- cette méthode ne dépend pas du choix parfois arbitraire des sites d'entrainement.

La classification non dirigée a été réalisée pour l'image LANDSAT du 13 juillet 2006 à l'aide de l'algorithme de regroupement par moyenne (K-means) du logiciel PCI Geomatica (voir Figure 4.9).

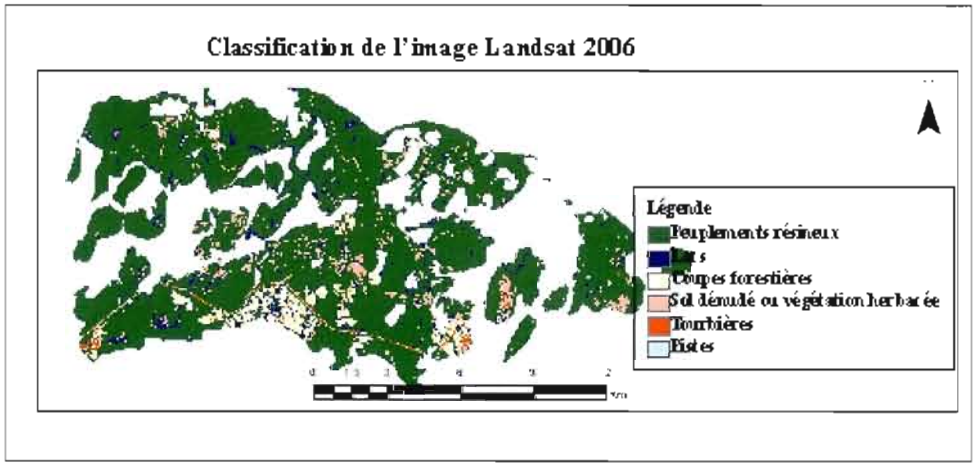

Figure 4.9 Classification de l'image LANDSAT 2006.

En se fondant sur les polygones de dommages du MRNF ainsi que sur les cartes écoforestières, on a pu facilement identifier les six classes résultant de la classification non dirigée sur l'image LANDSAT 2006 (Tableau 4.6).

Tableau 4.6 Liste des classes sur l'image LANDSAT 2006

Classe 1	Peuplements résineux
Classe 2	Lacs
Classe 3	Coupes forestières
Classe 4	Sol dénudé ou végétation herbacée
Classe 5	Tourbières
Classe 6	Pistes ou routes

À l'aide des résultats de la classification, nous avons pu d'une part séparer les sols nus, les tourbières, les coupes forestières ainsi que la végétation herbacée, et d'autre part éliminer ces aires de notre zone d'étude. Seules les zones de peuplements résineux ont été conservées. Ce masquage a aussi été appliqué à l'image LANDSAT du 16 juillet 2007 et à l'image SPOT du 13 juillet 2007, ce qui crée ainsi une même zone d'étude pour les trois images et isole les peuplements forestiers potentiellement affectés par la TBE (voir Figure 4.10).

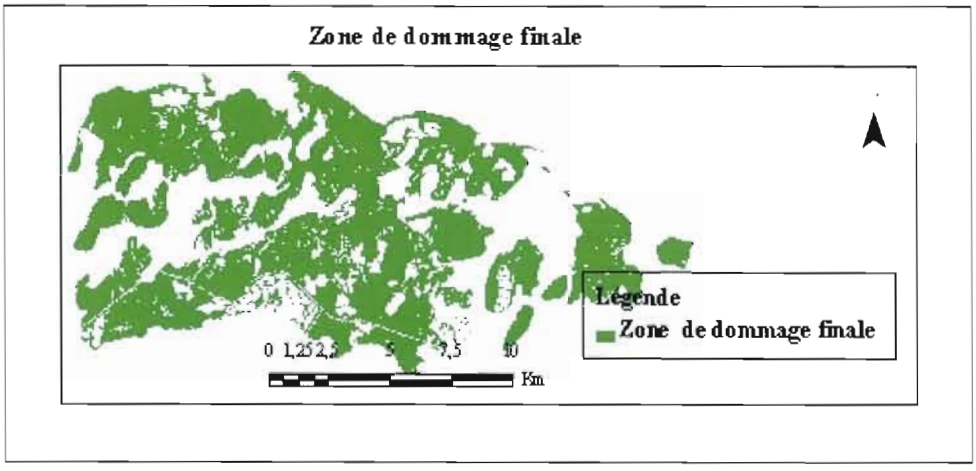

Figure 4.10 Masque des peuplements forestiers potentiellement affectés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

4.3.3.3 Moyennes par classe de dommages

Après l'application du découpage de la zone d'étude, pour les trois images, nous avons procédé aux calculs de différentes moyennes (sect. 4.4, 4.5 et 4.6). Ce calcul a été fait par degré de dommages, en utilisant toutes les valeurs de pixels, et selon l'outil « Statistics » du logiciel ArcMap.

4.4 Calcul des rapports de bandes

Pour bien comprendre les calculs qui seront présentés dans les prochains paragraphes, rappelons ici quelques importantes caractéristiques spectrales de la végétation en rapport avec les indices de végétation les plus utilisés dans la littérature.

4.4.1 Les propriétés spectrales du rouge et du PIR

Notre objectif est de déterminer si l'on observe une logique de dégradation selon le niveau de dommages dans les trois images, c'est-à-dire une logique croissante ou décroissante des moyennes des pixels allant de dommages graves à dommages légers. Pour comprendre cette logique, ajoutons ici certains détails.

Les végétaux chlorophylliens se caractérisent par des comportements particuliers dans les grands domaines spectraux. Dans le visible, la réflectance est globalement faible à cause des pigments chlorophylliens. Dans le proche infrarouge, la réflectance est plus ou moins forte en fonction de la structure des tissus ainsi que de la structure générale de la canopée et de l'importance de la biomasse chlorophyllienne. Sauf cas particulier, dans ce domaine spectral, la végétation chlorophyllienne a toujours des valeurs de réflectance plus fortes que les autres objets (sols, eau, minéraux, etc.; Girard et Girard, 1999). Les changements d'état physiologique (maturation, sénescence...) de la végétation se traduisent par des changements spectraux, et la disparition des pigments chlorophylliens conduit à des réflectances plus fortes dans le visible. On conclut alors que la réflectance d'une végétation en santé est relativement faible dans le rouge et forte dans le proche infrarouge, alors qu'une tendance contraire s'observe pour une végétation malade ou morte.

4.4.2 Les indices de végétation

Les indices de végétation proposent des combinaisons (linéaires ou non) des réflectances mesurées dans plusieurs bandes spectrales, en particulier dans les bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR), qui sont ciblées pour la caractérisation du couvert végétal. Ces indices permettent de réduire les effets des conditions d'acquisition (éclairement solaire, propriétés optiques du sol, etc.) par rapport à la valeur radiométrique observée. La littérature propose de nombreux indices spécifiques et sensibles aux caractéristiques du sol; ces derniers sont également plus ou moins sensibles aux conditions atmosphériques.

Un indice de végétation est construit dans l'objectif de réduire les mesures multispectrales à une seule valeur informative pour la prédiction et l'évaluation de caractéristiques de la végétation. Il existe différentes équations d'indices de végétation, généralement empiriques. En général, ces indices correspondent à la combinaison des mesures acquises dans le canal rouge (R) – longueur d'ondes absorbées par la chlorophylle pour la photosynthèse – et dans le proche infrarouge (PIR) – longueur d'ondes réfléchies par la surface des feuilles.

Dans notre cas, il est plus avantageux de nous appuyer sur des indices simples dont on connaît les limites plutôt que sur des indices plus complexes, mais dont les effets sont difficiles à estimer. C'est pour cette raison que nous avons opté pour les indices suivants : NDVI, VIN et SAVI.

4.4.2.1 L'indice de végétation de la différence normalisé (NDVI)

Nous donnons la formule de calcul du NDVI et la façon dont nous l'avons utilisé :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Connu surtout sous le sigle NDVI, cet indice est le plus couramment utilisé. Son emploi est simple et cette transformation est offerte par la plupart des logiciels de traitement d'images. La normalisation par la somme des deux bandes tend à réduire les effets d'éclairement ou de pente. Cela permet ainsi une comparaison de la couverture végétale en relative indépendance du relief (Bariou *et al.*, 1985). L'indice NDVI est un médiocre discriminateur des déficiences hydriques des plantes de forte densité végétale. Comme la plupart des indices, il est également sensible aux conditions atmosphériques.

Malgré les défauts cités précédemment, le NDVI connaît un taux d'application élevé. Il est en quelque sorte l'indice de végétation de référence. Il intervient notamment pour

l'analyse de l'évolution saisonnière de la végétation et – ce qui est un corollaire – pour la prévision de récoltes à l'échelle régionale ou de l'évolution à long terme des forêts boréales.

Le NDVI est préféré pour la surveillance globale de la végétation car il compense partiellement les changements de conditions d'illumination, la pente des surfaces et les angles de vues. Les nuages, l'eau et la neige ont un indice de réflexion plus élevé dans le visible que dans le proche infrarouge de sorte que le NDVI est négatif pour ces surfaces. La roche et le sol nu, qui ont des indices de réflexion similaires dans ces deux bandes, produisent un indice de végétation proche de zéro. Dans les scènes avec végétation, le NDVI peut varier de -1 à + 1, les valeurs les plus élevées étant associées à une forte densité et à une grande verdeur des feuillages des plantes (NOAA, 2008).

Donc, le NDVI peut être utilisé comme un indicateur de la biomasse relative de la verdure (Chen, 1998 ; Boone et al., 2000). Son utilisation dans la comparaison des peuplements forestiers en fonction de leur degré de dommages se révèle très intéressante.

4.4.2.2 Indice de végétation (VIN)

L'indice de végétation le plus ancien est le VIN (Ratio Vegetation Index). Il est défini par l'équation suivante :

$$VIN = \frac{PIR}{R}$$

PIR représente la réflectance dans la bande proche infrarouge et R correspond à la réflectance dans la bande rouge (visible). Lorsque la surface de végétation verte augmente, le dénominateur diminue et le numérateur augmente. Cet indice varie globalement de 1 pour les sols nus à plus de 20 pour la végétation dense (Knipling, 1970). Il permet d'accentuer le contraste entre la végétation et le sol et se trouve peu affecté par les conditions d'illumination. En revanche, sa sensibilité aux effets atmosphériques est grande et celle aux faibles taux de

couverture beaucoup plus restreinte. En général, cet indice semble donc plutôt adapté à la végétation dense.

4.4.2.3 Indice de végétation avec compensation des effets de sol (SAVI)

Huete (1988) a introduit une modification du NDVI en ajoutant un paramètre caractérisant le sol et son degré de couverture, comme le décrit l'équation suivante :

$$SAVI = \frac{(PIR - R)(L + 1)}{(PIR + R + L)}$$ [5]

Dans notre cas, vu que les peuplements que l'on a étudiés sont de forte densité, le coefficient du sol appliqué dans notre calcul est L= 0.25.

4.4.3 Rapports de bande

On a ici calculé la moyenne des valeurs de quelques indices de végétation tels que l'indice de végétation normalisé (NDVI), l'indice de végétation (VIN) et l'indice de végétation avec compensation des effets de sol (SAVI) pour chacun des niveaux de dommages. Ce calcul est effectué sur la base de la valeur des pixels extraits des trois images et pour trois niveaux de correction :

- les valeurs brutes;
- les valeurs des pixels après correction atmosphérique;
- les valeurs des pixels après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage.

---

[5] L≈1 pour une très faible densité de végétation.
L≈0,5 pour une densité de végétation moyenne.
L≈0,25 pour une forte densité de végétation.

Notre but pour ce calcul est de déterminer en même temps les effets de la correction atmosphérique et ceux du lignage sur notre capacité à distinguer les niveaux de dommages. Nous avons réuni dans le tableau 4.7 toutes les variables utilisées.

Tableau 4.7 Liste des variables

LANDSAT 2006	L6
LANDSAT 2007	L7
SPOT 2007	S7
La bande rouge	R
La bande infrarouge	PIR
Indice de végétation de la différence normalisé	NDVI
Indice de végétation	VIN
Indice de végétation avec compensation des effets de sol	SAVI

4.5 Comparaison multitemporelle

4.5.1 Par classe de dommages

4.5.1.1 Calcul de la moyenne par classe

Le calcul de la moyenne est effectué sur les bandes R, PIR, NDVI, VIN et SAVI, selon le degré de dommages dans les trois niveaux de correction présentés dans l'article 4.4.2. À partir de ce calcul, on peut en effet montrer le comportement des peuplements résineux affectés par la TBE. Pour ce faire, nous avons réuni dans un même tableau les trois images par degré de dommages (dommages légers, modérés ou graves), les bandes rouge et proches infrarouge et les indices de végétation.

4.5.1.2 Comparaison

Toutes les analyses de séries temporelles d'images satellitaires ont pour objectif de résumer une information organisée selon trois critères : le temps (date d'acquisition), l'espace (pixel) et les variables (canaux) et ce, pour trois niveaux de correction radiométrique.

Pour appréhender les évolutions temporelles, l'originalité de notre recherche consiste en l'établissement d'une comparaison multitemporelle et en même temps multicapteurs. Le critère temps que l'on a ici correspond aux années 2006 et 2007, le critère espace à la zone de dommages, et le critère canal aux bandes et à l'indice de végétation des trois images (L6, L7 et S7). Le tableau 4.8 présente l'objectif relié à chaque comparaison d'images.

Tableau 4.8 Objectifs de comparaison des moyennes

Comparaison	Objectif de la comparaison
LANDSAT 2007 et SPOT 2007	Comparer deux capteurs d'après le même état de végétation
LANDSAT 2006 et LANDSAT 2007	Détecter des changements d'après le même capteur (situation de référence)
LANDSAT 2006 et SPOT 2007	Détecter des changements à l'aide de deux capteurs différents
LANDSAT 2006 moins LANDSAT 2007 et LANDSAT 2006 moins SPOT 2007	Comparer les différences 2006-2007 selon deux paires de capteurs

4.5.2 La différence

Par le calcul de la différence des bandes (R et PIR) et des indices de végétation (NDVI, VIN et SAVI), on peut interpréter la relation qui existe, d'une part, entre deux capteurs différents et, d'autre part, entre deux capteurs similaires. L'utilité de ce calcul est de déterminer comment varient spatialement les changements entre les bandes et les indices des trois images.

4.5.3 La corrélation

4.5.3.1 Corrélation entre les bandes

Nous souhaitons d'abord connaître par ce calcul la corrélation existant entre les valeurs des pixels de deux capteurs différents pour le même état de végétation (été 2007). Cette corrélation devrait être élevée. Par la suite, en calculant le coefficient de corrélation entre L6 et L7, nous évaluons des changements d'après le même capteur. Ici, la corrélation devrait être plus faible. Enfin, la corrélation entre L6 et S7 a été calculée pour renseigner sur la détection des changements entre deux capteurs différents.

En résumé, par le calcul de ces corrélations, deux éléments sont déterminés : premièrement, la façon dont le degré de dommages se comporte sur une même année entre deux images prises par deux capteurs différents (LANDSAT et SPOT) à des dates moyennement proches; deuxièmement, la façon dont le niveau de dommages se comporte entre deux capteurs similaires (LANDSAT) mais à deux années différentes.

4.5.3.2 Corrélations des différences

Les différences montrent la répartition spatiale des changements. Théoriquement, la corrélation des différences L6-L7 et L6-S7 devrait être de 1.0. Une valeur inférieure à 1.0 nous indiquera dans quelle mesure l'utilisation de capteurs différents nuit à la détection des changements. La même observation sera faite pour deux capteurs différents, soit L6 et S7. Enfin, nous appliquerons un filtre moyen (3x3) pour :

- éviter que le bruit (bruit aléatoire, lignage, etc.) n'ait une influence sur la corrélation;
- éviter que les erreurs résiduelles d'ajustement géométrique n'affectent la corrélation (Figure 4.11).

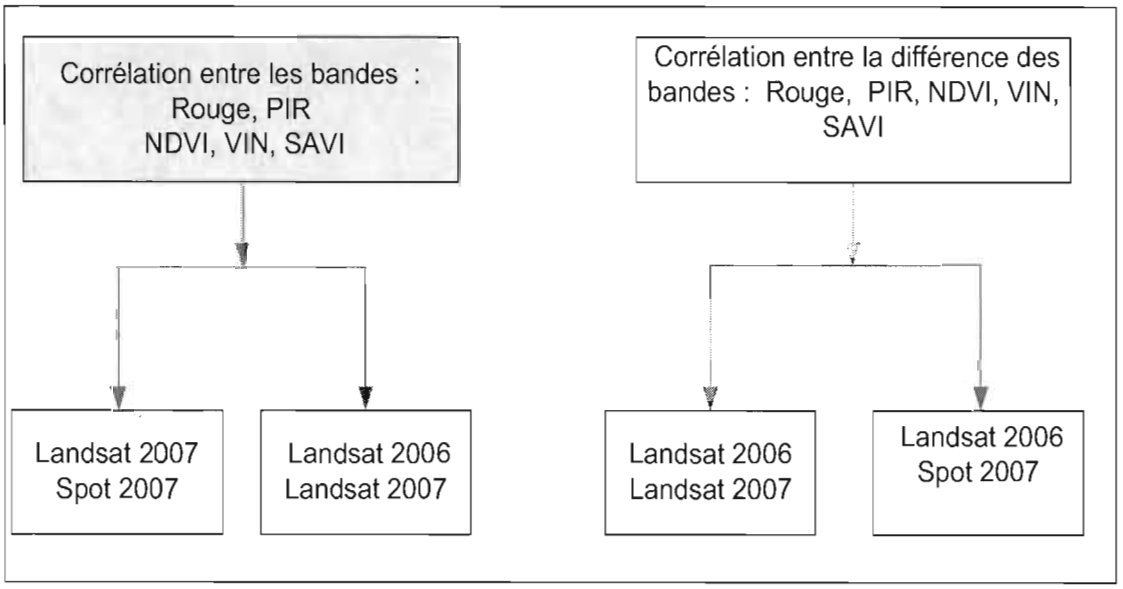

Figure 4.11 Applications du coefficient de corrélation.

4.5.4 ANOVA et ANCOVA

Pour analyser si les différences entre les niveaux de dommages sur une image, entre les images et entre les couples d'images sont significatives, nous avons eu recours à deux

approches statistiques : une approche de variance (ANOVA) et une de covariance (ANCOVA). L'analyse de variance (ANOVA) permet d'établir s'il existe des différences significatives entre les valeurs numériques dans la même image par rapport au degré de dommages (dommages légers, modérés ou graves). Cette analyse consiste en un test d'hypothèse qui s'applique à deux ou plusieurs échantillons : on se demande si les différences observables dans l'échantillon correspondent, ou non, à des différences dans les populations des groupes.

Pour déterminer si des différences existent entre deux images ou entre deux couples d'images par rapport aux différents degrés de dommages (légers, modérés ou graves), on emploie une analyse de covariance (ANCOVA). Cette analyse procède à la fois de l'analyse de variance et de la régression linéaire simple.

L'ANCOVA est utilisée pour comparer des modèles linéaires afin de voir s'il y a relation entre une variable dépendante (*Y*) et une variable indépendante (*X1*) et ce, pour différents niveaux d'une variable discontinue (*X2*).

Dans notre cas, les variables quantitatives regroupent les valeurs des pixels et des indices de végétation, soit la bande rouge, la bande proche infrarouge et l'indice de végétation NDVI extraits des trois images. Les variables catégoriques sont les différents niveaux de dommages (graves [1], modérés [2], légers [3]). Nous voudrions déterminer par ce test statistique si l'interaction entre les bandes et le NDVI des trois images se manifeste de la même manière par rapport au degré de dommages. Le logiciel que l'on a utilisé pour notre analyse de statistique est le logiciel JMP.

L'interprétation des résultats des tests ANOVA et ANCOVA a été effectuée selon des tableaux du F-ratio (rapport de variance) ainsi que d'après le coefficient de probabilité P (test de signification) qui montre les interactions existant entre des moyennes. Pour l'ANOVA, des histogrammes des moyennes des valeurs de pixels par rapport au degré de

dommages ont été réalisés, tandis que pour l'ANCOVA, des graphiques représentant des droites de régression selon le degré de dommages ont été préparés.

Nous avons limité notre calcul aux valeurs des pixels obtenus après correction atmosphérique. Nous avons ainsi exclu les valeurs des pixels mesurées avant correction atmosphérique de même que celles obtenues après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage. Notre objectif en cela est de donner une interprétation des résultats qui soit fidèle à la réalité. En effet, les valeurs des pixels obtenues avant correction atmosphérique ne traduisent pas directement la réflectance réelle des végétaux; de plus, les calculs obtenus après traitement des effets du lignage sont presque identiques à ceux obtenus après correction atmosphérique seule (d'où la redondance dans la présentation des résultats).

Les canaux visés par l'analyse statistique sont ceux du rouge, du proche infrarouge et du NDVI. Les autres indices, le VIN et le SAVI, qui sont seulement des combinaisons du rouge et du proche infrarouge, sont exclus de nos calculs statistiques pour éviter d'allonger indûment la présentation des résultats.

CHAPITRE V

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Nous présentons dans ce chapitre les résultats, répartis et classés selon le plan méthodologique apparaissant au chapitre précédent.

5.1 Prétraitement des données

5.1.1 Corrections géométriques

Les trois images ont été corrigées géométriquement par orthorectification dans le logiciel PCI Geomatica, avec un RMS moyen de 0,26 pixel. On peut maintenant mieux établir la correspondance entre ces trois images (voir Figures 5.1 à 5.9).

Tableau 5.1 RMS de la correction des images

RMS LANDSAT 2006	0,35
RMS LANDSAT 2007	0,28
RMS SPOT 2007	0,15
Moyenne RMS	0,26

Nous présentons ci-dessous les images résultant de ces corrections.

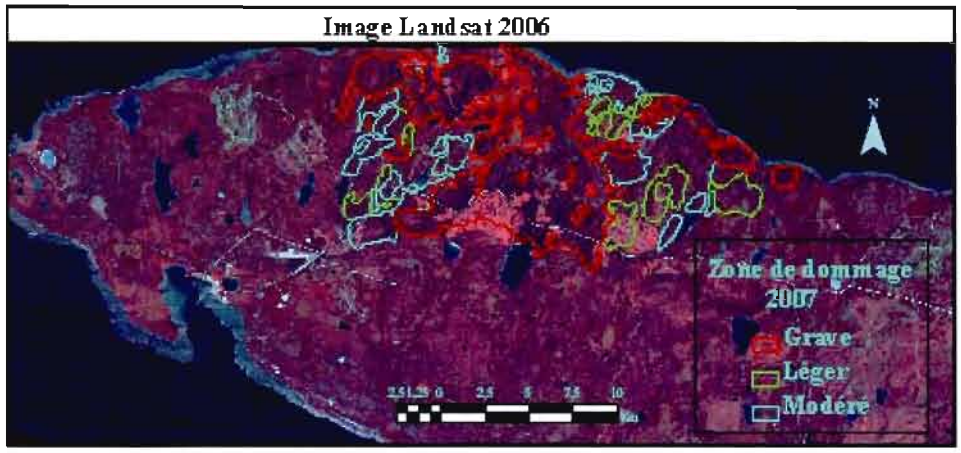

Figure 5.1 Ortho-image LANDSAT du 13 juillet 2006.

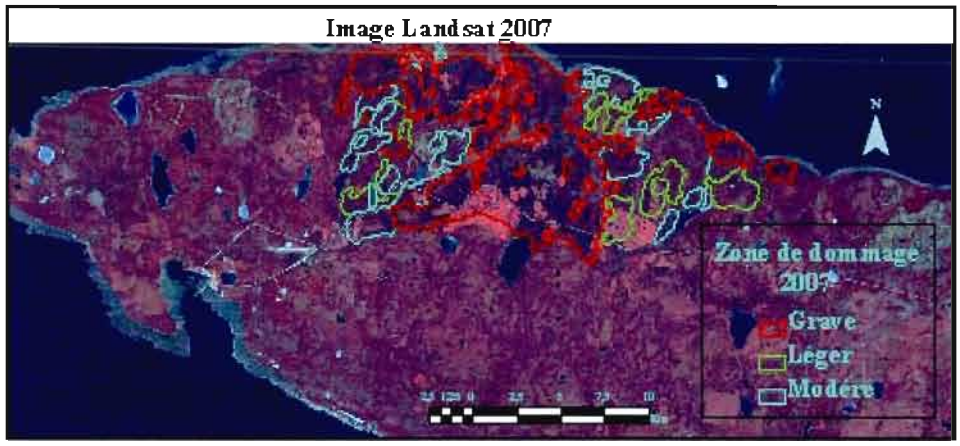

Figure 5.2 Ortho-image LANDSAT du 16 juillet 2007.

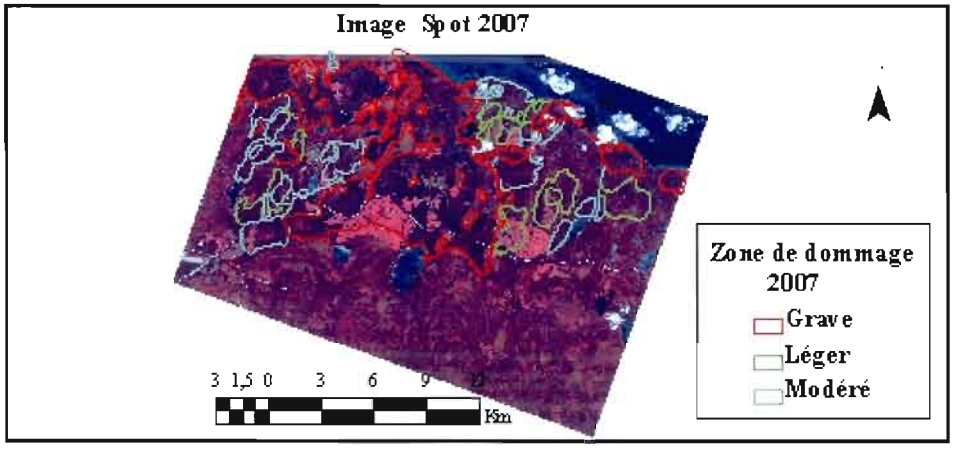

Figure 5.3 Ortho-image SPOT du 13 juillet 2007.

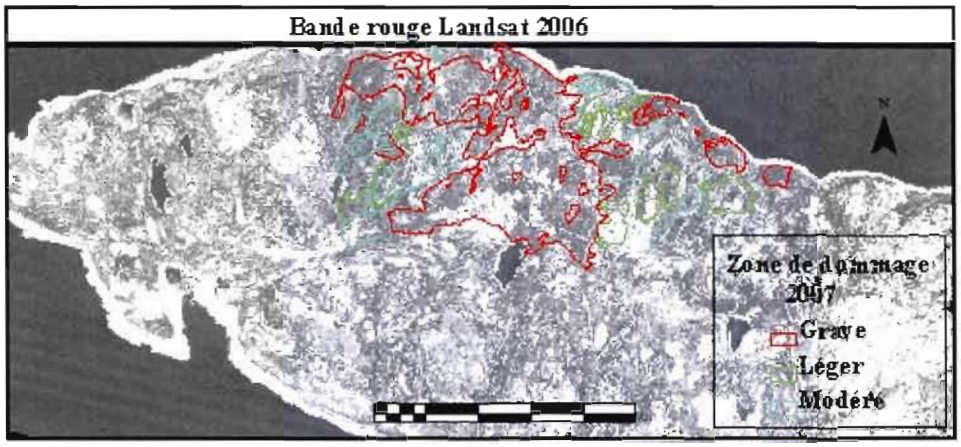

Figure 5.4 Bande rouge de l'ortho-image LANDSAT de 2006.

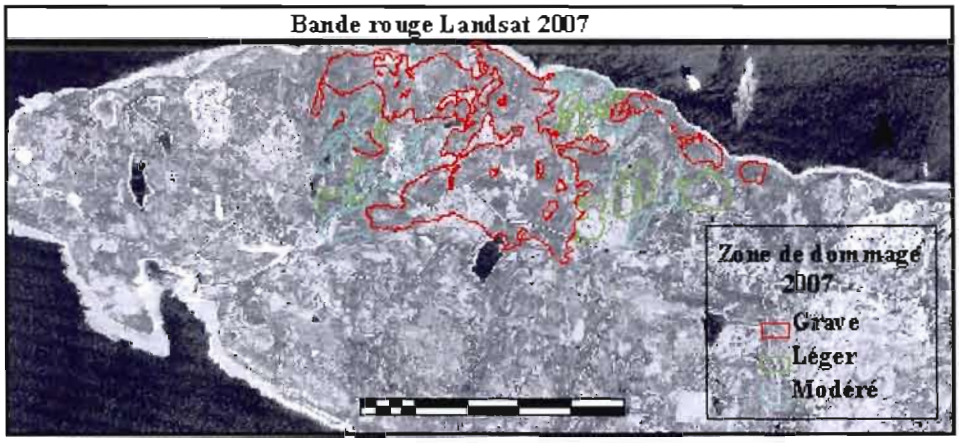

Figure 5.5 Bande rouge de l'ortho-image LANDSAT de 2007.

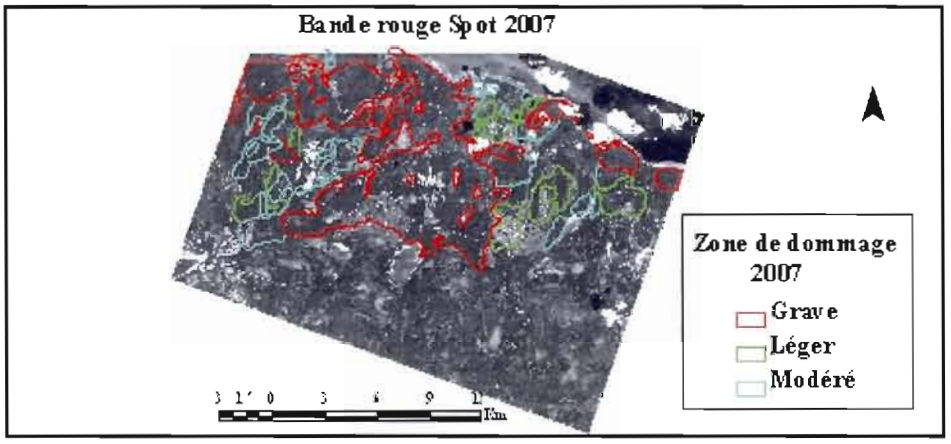

Figure 5.6 Bande rouge de l'ortho-image SPOT de 2007.

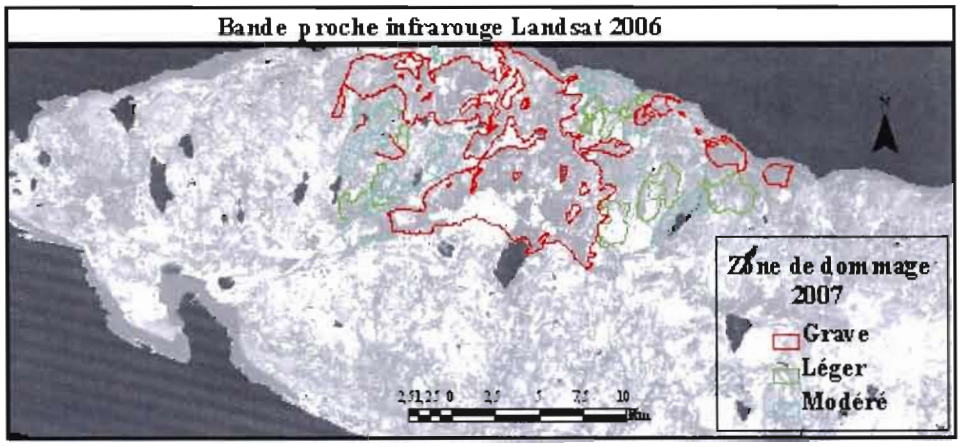

Figure 5.7 Bande PIR de l'ortho-image LANDSAT de 2006.

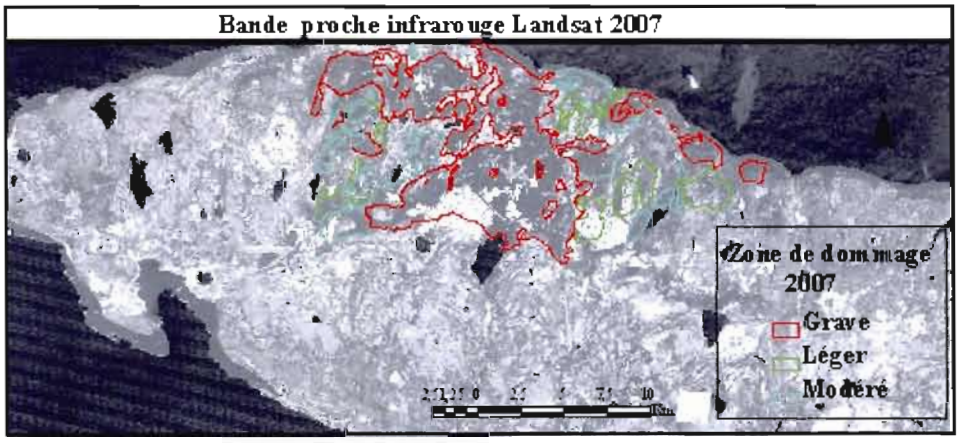

Figure 5.8 Bande PIR de l'ortho-image LANDSAT de 2007.

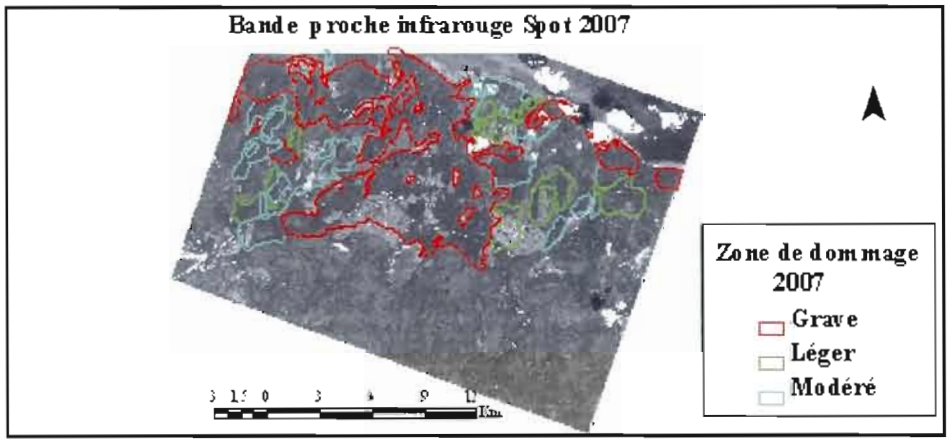

Figure 5.9 Bande PIR de l'ortho-image SPOT de 2007.

5.1.2 Corrections radiométriques

5.1.2.1 Corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques comprennent, entre autres, la correction des données à cause du bruit dû au capteur ou à l'atmosphère et la conversion des données et ce, afin de pouvoir précisément représenter le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. L'application de l'algorithme ATCOR 2 du logiciel PCI Geomatica a été utilisée pour corriger les effets de l'atmosphère, ce qui a permis de créer trois nouvelles images aux statistiques modifiées.

5.1.2.2 Correction des effets de lignage

L'application de l'algorithme DSTRIPE du logiciel PCI Geomatica sur les images LANDSAT (2006 et 2007) a très partiellement corrigé les effets du lignage (voir Figures 5.10 et 5.11). On verra plus loin que les calculs effectués après cette correction donnent des résultats légèrement différents de ceux qui avaient été produits après correction atmosphérique uniquement.

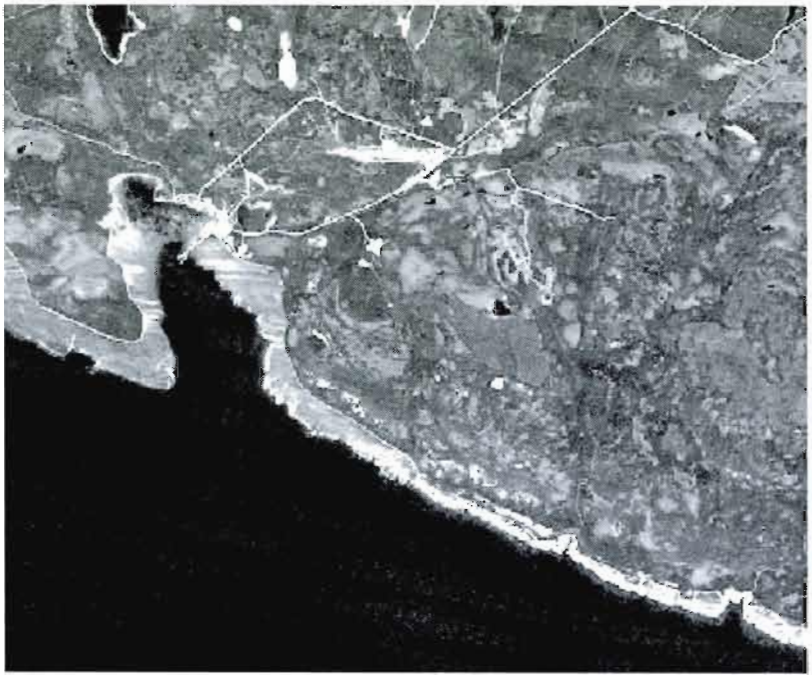

Figure 5.10 Lignage dans le canal rouge de LANDSAT 2007.

Figure 5.11 Lignage après traitement dans le canal rouge de LANDSAT 2007.

5.1.3 Découpage des secteurs d'étude

Après l'application de la classification non supervisée en utilisant l'algorithme K-means, on a pu classifier les différentes occupations de notre zone d'étude. En se servant des données auxiliaires en notre possession, notamment des cartes éco-forestières et des polygones de dommages du MRNF (voir sect. 4.3.3), six classes au total ont été identifiées (voir Tableau 5.2).

Tableau 5.2 La superficie des classes

Numéro de classe	Description	Superficie (m^2)
Classe 1	Peuplements résineux	119 907 900
Classe 2	Lacs	7 018 200
Classe 3	Coupes forestières	7 604 100
Classe 4	Sol dénudé ou végétation herbacée	7 014 600
Classe 5	Tourbières	1 429 200
Classe 6	Chemins ou routes	358 200

La figure 5.12 présente la zone finale de dommages. En se servant des polygones de ce secteur d'étude final, un découpage a été appliqué pour les trois images. Ainsi, on peut visualiser une même zone d'étude regroupant les mêmes pixels (voir Figures 5.13-5.15).

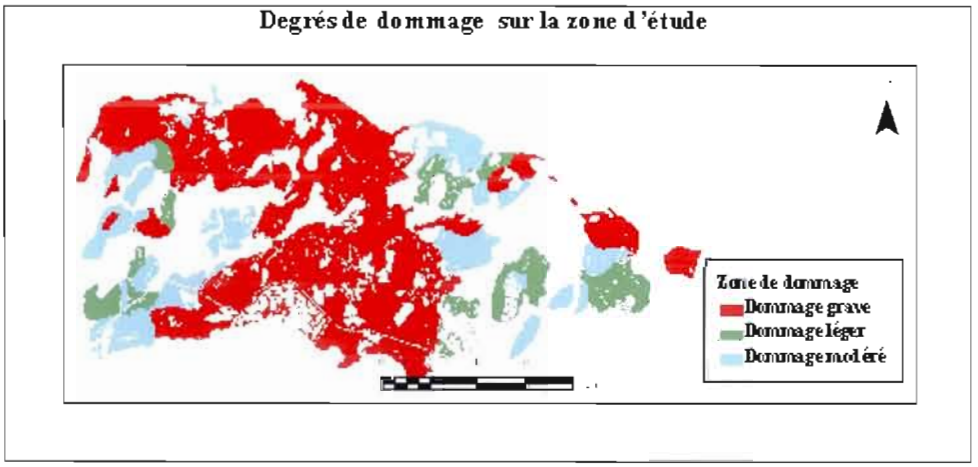

Figure 5.12 Zone d'étude de dommages finale.

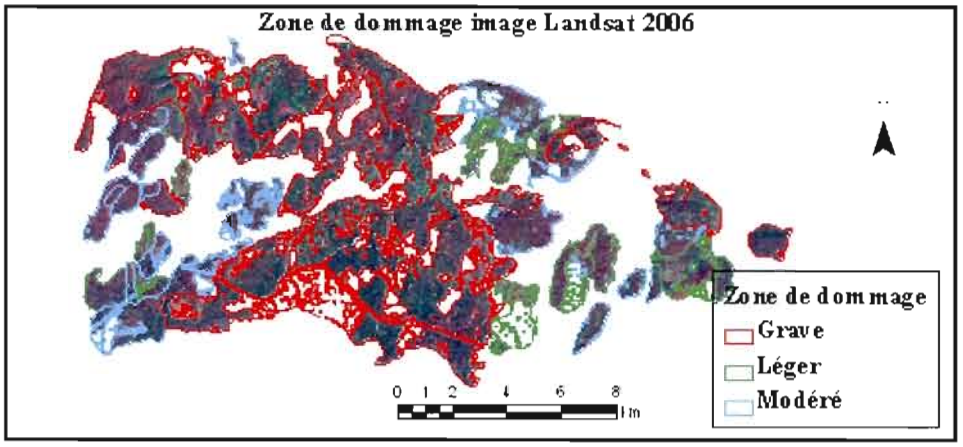

Figure 5.13 Zone d'étude après masquage de l'image LANDSAT 2006.

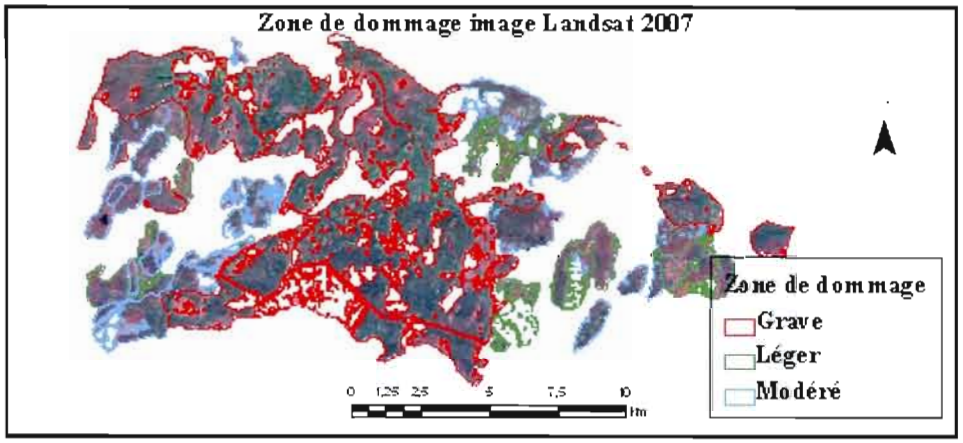

Figure 5.14 Zone d'étude après masquage de l'image LANDSAT 2007.

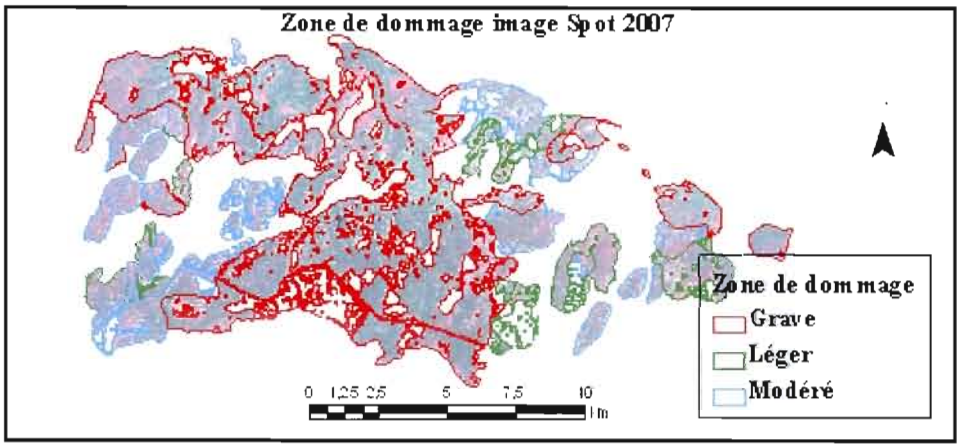

Figure 5.15 Zone de dommages de l'image SPOT 2007.

5.2 Comparaison multitemporelle

5.2.1 Par classe de dommages

5.2.1.1 Calcul de la moyenne par classe

Dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5, on présente la moyenne des bandes et indices des trois images L6, L7 et S7, selon le degré de dommages et en considérant trois situations différentes : les données brutes, les données obtenues après correction atmosphérique, et enfin les données obtenues après correction des effets du lignage.

Les images L7 et S7 sont utilisées pour la comparaison de deux capteurs selon le même état de végétation. Les images L6 et L7 sont, quant à elles, utilisées pour la détection des changements standards entre deux capteurs similaires. Enfin, les images L6 et S7 ont été utilisées pour l'étude des changements selon deux capteurs différents.

Tableau 5.3 Moyenne avant correction atmosphérique

	Dommages légers			Dommages modérés			Dommages graves		
	L6	L7	S7	L6	L7	S7	L6	L7	S7
R	18,67	18,85	58,92	18,41	18,81	58,57	18,58	19,09	59,44
PIR	59,39	54,26	89,01	58,45	51,33	88.00	57,03	49,06	87,83
NDVI	0,51	0,47	0,20	0,51	0,45	0,20	0,49	0,42	0,19
VIN	3,17	2,86	1,50	3,16	2,71	1,49	3,05	2,55	1,46
SAVI	0,64	0,59	0,25	0,63	0,56	0,25	0,62	0,53	0,24

Tableau 5.4 Moyenne après correction atmosphérique

	Dommages légers			Dommages modérés			Dommages graves		
	L6	L7	S7	L6	L7	S7	L6	L7	S7
R	3,27	3,51	11,39	2,92	3,37	11,17	3,01	3,71	11,64
PIR	84,90	76,83	139,38	83,25	71,64	137,59	80,85	67,74	137,39
NDVI	0,91	0,90	0,84	0,92	0,90	0,84	0,92	0,89	0,84
VIN	54,29	44,05	14,06	58,17	41,87	13,87	58,36	34,67	13,16
SAVI	1,14	1,13	1,055	1,15	1,12	1,05	1,14	1,11	1,04

Tableau 5.5 Moyenne après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage

	Dommages légers			Dommages modérés			Dommages graves		
	L6	L7	S7	L6	L7	S7	L6	L7	S7
R	3,95	4,26	11,20	3,53	4,11	10,97	3,69	4,43	11,40
PIR	85,40	77,47	138,04	83,85	72,21	136,21	81,01	68,01	135,83
NDVI	0,90	0,89	0,84	0,91	0,88	0,84	0,90	0,87	0,84
VIN	45,88	37,46	14,18	49,09	35,07	13,99	43,48	28,96	13,27
SAVI	1,12	1,11	1,05	1,13	1,10	1,05	1,13	1,08	1,04

On constate que la valeur du PIR diminue au fur et à mesure qu'augmente le niveau de dommages et ce, pour toutes les images : L6, L7 et S7.

De leur côté, les moyennes de la bande rouge des trois images sont moins élevées après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage que celles que nous avions

obtenues avant correction atmosphérique. Pour les images L7 et S7, on observe que les moyennes des valeurs des dommages graves ont tendance à être supérieures à celles des dommages légers. En ce qui concerne les dommages modérés, une diminution des valeurs du rouge est constatée par comparaison aux dommages légers. Par contre, pour l'image L6, la moyenne des dommages légers est supérieure aux moyennes obtenues pour les dommages modérés et graves.

En ce qui se rapporte à la situation après traitement des effets du lignage, on observe une légère augmentation de la moyenne des valeurs des pixels pour les trois images. Mais la logique de comparaison est identique à la situation précédente.

Pour ce qui est des rapports de bandes, les moyennes obtenues avant correction atmosphérique sont moins élevées que celles auxquelles nous sommes parvenus après uniquement correction atmosphérique et le traitement des effets de lignage. Par ailleurs, la tendance des valeurs des pixels varie entre des résultats proportionnels et similaires par rapport aux degrés de dommages.

5.2.1.2 Comparaison des images

Les corrélations calculées pixel à pixel sont présentées dans les tableaux 5.6, 5.7 et 5.8. Afin d'améliorer les résultats de corrélation, des filtres moyens de 3x3 ont été appliqués. On constate qu'effectivement, l'application de ce type de filtrage s'accompagne du lissage de l'image – obtenu par remplacement de chaque pixel par la valeur moyenne de ses voisins –, de la réduction des bruits et de la diminution des détails non importants.

Tableau 5.6 Application du coefficient de corrélation avant correction atmosphérique

	Coefficient de corrélation									
	R	R Fil[6]	PIR	PIR Fil	NDVI	NDVI Fil	VIN	VIN Fil	SAVI	SAVI Fil
L7 et S7	0,62	0,91	0,48	0,70	0,52	0,84	0,48	0,75	0,52	0,84
L6 et L7	0,70	0,94	0,82	0,91	0,73	0,89	0,74	0,89	0,73	0,89
L6 et S7	0,59	0,91	0,44	0,78	0,52	0,87	0,50	0,83	0,52	0,87

Tableau 5.7 Application du coefficient de corrélation après correction atmosphérique

	Coefficient de corrélation									
	R	R Fil	PIR	PIR Fil	NDVI	NDVI Fil	VIN	VIN Fil	SAVI	SAVI Fil
L7 et S7	0,57	0,67	0,48	0,58	0,61	0,95	0,36	0,57	0,61	0,95
L6 et L7	0,67	0,79	0,81	0,88	0,71	0,97	0,53	0,75	0,71	0,97
L6 et S7	0,53	0,63	0,41	0,68	0,65	0,97	0,35	0,59	0,65	0,97

Tableau 5.8 Application du coefficient de corrélation après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage

	Coefficient de corrélation									
	R	R Fil	PIR	PIR Fil	NDVI	NDVI Fil	VIN	VIN Fil	SAVI	SAVI Fil
L7 et S7	0,49	0,62	0,43	0,60	0,59	0,94	0,30	0,52	0,68	0,94
L6 et L7	0,64	0,74	0,76	0,85	0,70	0,95	0,43	0,64	0,70	0,95
L6 et S7	0,58	0,65	0,42	0,72	0,68	0,96	0,34	0,54	0,68	0,96

Après le calcul des différentes corrélations, la première constatation est que les corrélations après le filtrage sont nettement supérieures. Les bandes et rapports de bandes des images issues de mêmes capteurs, tels que L6 et L7, sont bien corrélés entre eux. Le coefficient de corrélation entre L6 et S7 est moins fort que celui entre L7 et S7. Même si la situation est quelque peu différente après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage, on constate cependant que les corrélations sont moins fortes par rapport aux situations qui prévalaient avant et après correction atmosphérique.

[6] Filtre 3x3.

5.2.2 Différence

Le tableau 5.9 présente des différences entre nos couples d'images. La situation considérée ici est celle que nous observons après correction atmosphérique.

Tableau 5.9 La différence entre les images après correction atmosphérique

Différence		Moyenne par degré de dommages		
		léger	modéré	grave
Rouge	L6 - L7	-0,24	-0,45	-0,707
	L6 - S7	-8,12	-8,25	-8,63
PIR	L6 - L7	8,07	11,60	13,11
	L6 - S7	-54,47	-54,33	-56,53
NDVI	L6 - L7	0,0113	0,0198	0,02981
	L6 - S7	0,0738	0,0793	0,0820
VIN	L6 - L7	40,22	44,29	40,20
	L6 - S7	10,23	16,29	18,69
SAVI	L6 - L7	0,0908	0,0976	0,10
	L6 - S7	0,0145	0,0253	0,0378

Les résultats de l'application des différences au niveau des bandes et des indices se sont révélés intéressants pour comparer la détection du degré de dommages entre les différents couples d'images. Donc, une grande différence signifie qu'il y a un changement important, et par conséquent un dommage sensible.

Dans le tableau 5.9, on observe de façon générale une augmentation au niveau de la différence entre les bandes et les indices des images L6 et L7 de même qu'entre les images L6 et S7. Cette augmentation va d'un niveau de dommages léger à un niveau de dommage grave. Cependant, cette constatation n'est observée ni pour la différence du PIR de L6 et S7 lorsqu'il s'agit de dommages modérés, ni pour la différence du VIN de L6 et L7 lorsqu'il s'agit de dommages graves. Cela n'empêche pas de dire que la moyenne des différences augmente lorsque le niveau de dommages augmente.

5.2.3 Corrélations

Le tableau 5.10 présente la corrélation calculée entre la différence des bandes et des rapports de bandes entre deux couples d'images quand on considère tous les pixels de notre zone d'étude.

Tableau 5.10 La corrélation entre les différences

Différence de moyenne	Coefficient de Corrélation	Coefficient de corrélation avec Filtre Moy 3*3
La différence avant correction atmosphérique		
R (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,16	0,16
PIR (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,25	-0,04
NDVI (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,27	0,39
VIN (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,40	0,46
SAVI (L6 - L7et (L6 - S7)	0,27	0,39
La différence après correction atmosphérique		
R (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,36	0,35
PIR (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,26	-0,01
NDVI (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,39	0,30
VIN (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,64	0,64
SAVI (L6 - L7et (L6 - S7)	0,39	0,33
La différence après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage		
R (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,22	0,29
PIR (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,21	0,03
NDVI (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,36	0,35
VIN (L6 - L7) et (L6 - S7)	0,69	0,68
SAVI (L6 - L7et (L6 - S7)	0,36	0,35

Dans le tableau 5.10, on constate que la corrélation des différences après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage est plus ou moins forte par comparaison à la situation avant correction atmosphérique. On voit par ailleurs que le coefficient de corrélation de la différence (L6 - L7) et (L6 - S7) du canal rouge est nettement supérieur à celui de la différence calculée dans la bande PIR pour la situation après correction atmosphérique. Il en va de même dans la situation après traitement des effets de lignage. Finalement, pour les indices de végétation, on observe que le coefficient de la différence du VIN est fort par

rapport au SAVI et au NDVI. Le filtre qu'on a appliqué n'a amélioré que partiellement la différence avant correction atmosphérique.

5.2.4 ANOVA et ANCOVA

Nous présentons ci-dessous l'illustration graphique des résultats de l'ANOVA et de l'ANCOVA

5.2.4.1 Analyse de variance (ANOVA)

Le tableau 5.11 présente le degré de signification (P) calculé entre nos différentes moyennes entre les bandes et rapports de bandes. On constate qu'effectivement, la différence entre nos moyennes est significative ($P < 0,05$).

Tableau 5.11 Test de probabilité ANOVA (P)

	Source	Nbre paramé	Degré de liberté	Somme des carrés	F Ratio	Prob > P
PIR L6	Degré de dommages	2	2	383076,08	713,4304	<,0001
Rouge L6	Degré de dommages	2	2	1456,2450	52,6648	<,0001
NDVI L6	Degré de dommages	2	2	0,57784496	40,4956	<,0001
PIR L7	Degré de dommages	2	2	1518325,9	2107,294	0,0000
Rouge L7	Degré de dommages	2	2	2529,1933	79,3879	<,0001
NDVI L7	Degré de dommages	2	2	8,8269864	539,2428	<,0001
PIR S7	Degré de dommages	2	2	97307,613	191,1037	<,0001
Rouge S7	Degré de dommages	2	2	4253,8121	56,4050	<,0001
NDVI S7	Degré de dommages	2	2	2,0736430	271,6017	<,0001

Pour bien visualiser cette différence significative entre bandes et NDVI, on a préféré montrer, en plus du tableau 5.11, quelques histogrammes illustrant la moyenne par bandes et par NDVI suivant le degré de dommages (Figures 5.16, 5.17 et 5.18). Rappelons ici que les moyennes présentées représentent seulement les données obtenues après correction atmosphérique et ce, pour éviter la redondance dans la présentation des résultats.

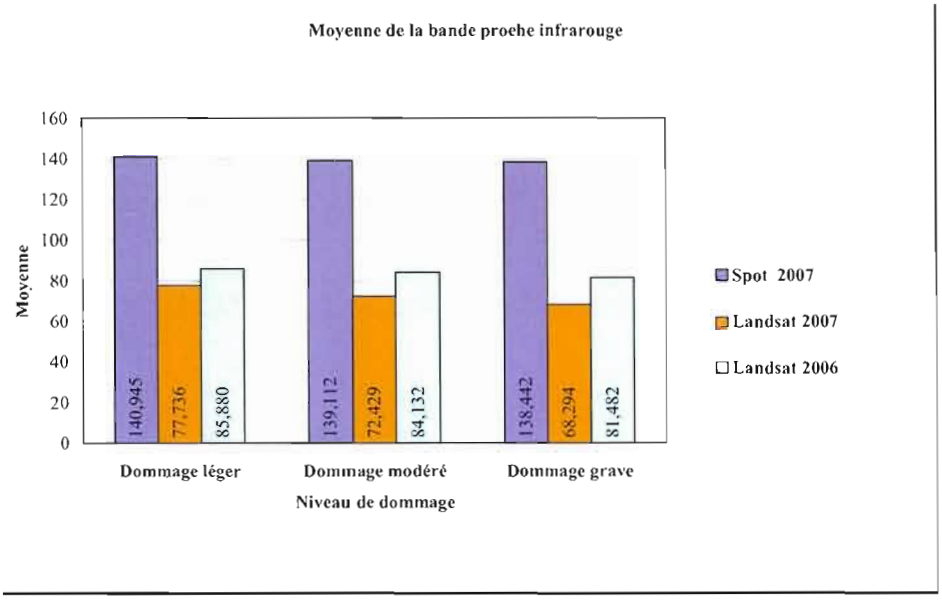

Figure 5.16 Moyenne du PIR des trois images.

Dans la figure 5.16, on constate que la différence des moyennes par rapport aux degrés de dommages des trois images est faible. Toutefois, les résultats de l'ANOVA (Tableau 5.11) montrent qu'elle est significative. La moyenne du PIR des trois images diminue quand on passe de dommages légers à dommages modérés. Cette différence est plus masquée dans L7 par comparaison à S7 et L6.

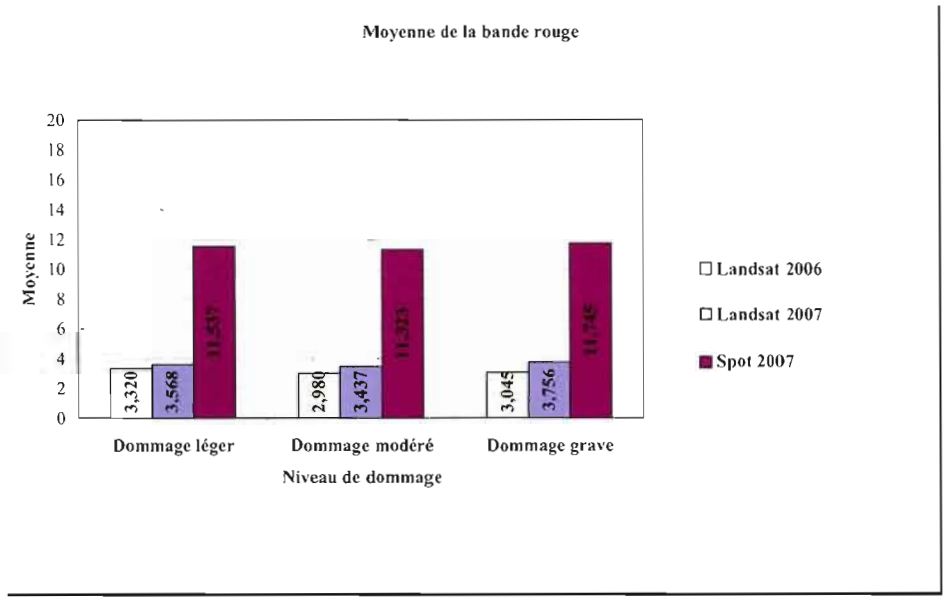

Figure 5.17 Moyenne de la bande rouge pour L6, L7 et S7.

La figure 5.17 est une représentation des moyennes de la bande rouge par degré de dommages des trois images. La moyenne de la bande rouge de S7 est supérieure à celle de L7 et L6. On constate dans toutes les images que la moyenne se rapportant aux dommages légers est moins élevée que celle des dommages graves. Mais lorsqu'il s'agit de dommages modérés, la moyenne est encore moins élevée que dans le cas de dommages légers ou graves.

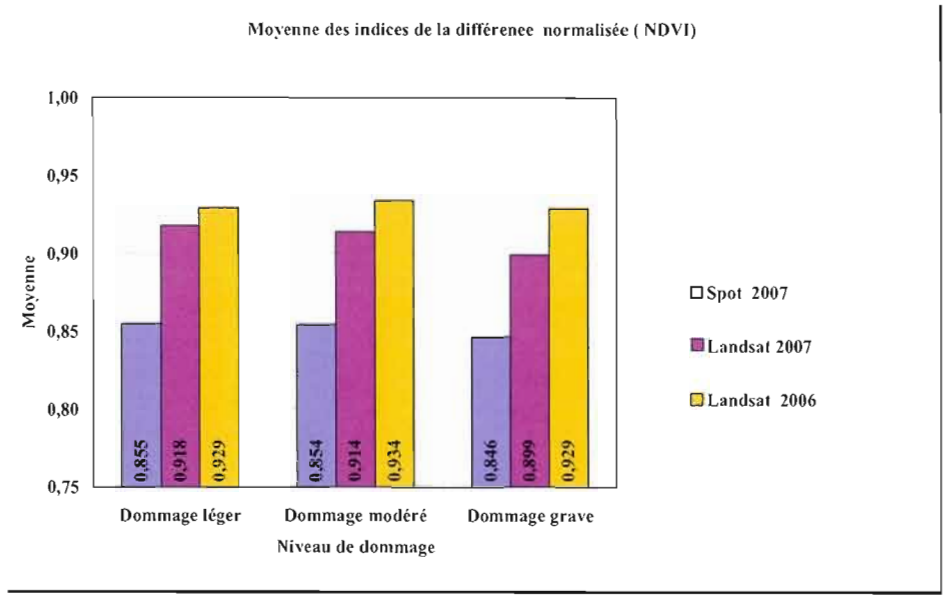

Figure 5.18 Moyenne des NDVI des trois images.

On constate dans la figure 5.18 que le NDVI de L7 et S7 diminue de façon légère en allant de dommages légers à dommages graves. Par contre, pour L6, on remarque que le NDVI des dommages légers est similaire à celui des dommages graves. Mais lorsqu'il s'agit de dommages modérés, la moyenne est légèrement supérieure.

5.2.4.2 Analyse de covariance (ANCOVA)

Comme pour l'ANOVA, le tableau 5.12 présente le degré de signification (P). On remarque que $P < 0,05$ pour l'ensemble des tests, ce qui montre que la différence entre nos moyennes est bien significative.

Tableau 5.12 Test de probabilité ANCOVA (P)

	Source	Nbre paramé	Degré de liberté	Somme des carrés	F Ratio	Prob > P
L6 et L7	PIR L6 après CA[7]	1	1	15959769	131353,0	0,0000
	Degré de dommages	2	2	439876	1810,147	0,0000
	Degré de dommages*PIR L6 après CA	2	2	20080	82,6333	<,0001
	Rouge L6 après CA	1	1	696627,05	79605,23	0,0000
	Degré de dommages	2	2	3234,63	184,8147	<,0001
	Degré de dommages*Rouge L6 après CA	2	2	399,45	22,8228	<,0001
	NDVI L6 après CA	1	1	322,27211	80796,43	0,0000
	Degré de dommages	2	2	6,84116	857,5687	0,0000
	Degré de dommages*NDVI L6 après CA	2	2	0,43319	54,3017	<,0001
L6 et S7	PIR L6 après CA	1	1	2796151,6	13230,46	0,0000
	Degré de dommages	2	2	19348,8	45,7760	<,0001
	Degré de dommages*PIR 6 après CA	2	2	13173,0	31,1651	<,0001
	Rouge L6 après CA	1	1	1063109,3	39191,62	0,0000
	Degré de dommages	2	2	5160,4	95,1189	<,0001
	Degré de dommages*Rouge L6 après CA	2	2	1009,7	18,6115	<,0001
	NDVI L6 après CA	1	1	114,55175	52629,24	0,0000
	Degré de dommages	2	2	1,43549	329,7573	<,0001
	Degré de dommages*NDVI L6 après CA	2	2	1,34613	309,2316	<,0001
L7 et S7	PIR S7 après CA	1	1	5745426,8	20674,42	0,0000
	Degré de dommages	2	2	1140169,5	2051,400	0,0000
	Degré de dommages*PIR S7 après CA	2	2	128059,1	230,4048	<,0001
	Rouge S7 après CA	1	1	497357,91	46489,29	0,0000
	Degré de dommages	2	2	713,09	33,3272	<,0001
	Degré de dommages*Rouge S7 après CA	2	2	1148,16	53,6609	<,0001
	NDVI S7 après CA	1	1	220,57023	42502,44	0,0000
	Degré de dommages	2	2	2,82415	272,0972	<,0001
	Degré de dommages*NDVI S7 après CA	2	2	0,09654	9,3011	<,0001

Pour analyser cette différence significative, des droites de régression des bandes et du NDVI entre des couples d'images sont présentées selon le degré de dommages, dans les figures 5.19 à 5.27. Les dommages légers sont présentés en bleu, les dommages modérés en vert et les dommages graves en rouge. D'après le test ANCOVA appliqué pour les couples d'images (L6, L7), (L6, L7) et (L7, S7), on peut confirmer que la différence observée est significative. Cependant, on constate que les droites de régression représentant les degrés de dommages sont bien différentes (les droites ne sont pas parallèles) et ce, pour tous les couples d'images. Cette différence est bien observée pour le couple (L6, L7) (Figures 5.15-5.21).

[7] CA : Correction atmosphérique

Cependant, elle est moindre pour les couples (L6, S7) et (L7, S7) (Figures 5.22-5.27). Donc, d'après ces résultats, on peut conclure que la signature spectrale des bandes et des rapports (R, PIR, NDVI) change selon le degré de dommages (léger, modéré, grave). Ce changement est bien observé pour les deux images LANDSAT. Il est toutefois de moindre ampleur pour ce qui est de l'image SPOT.

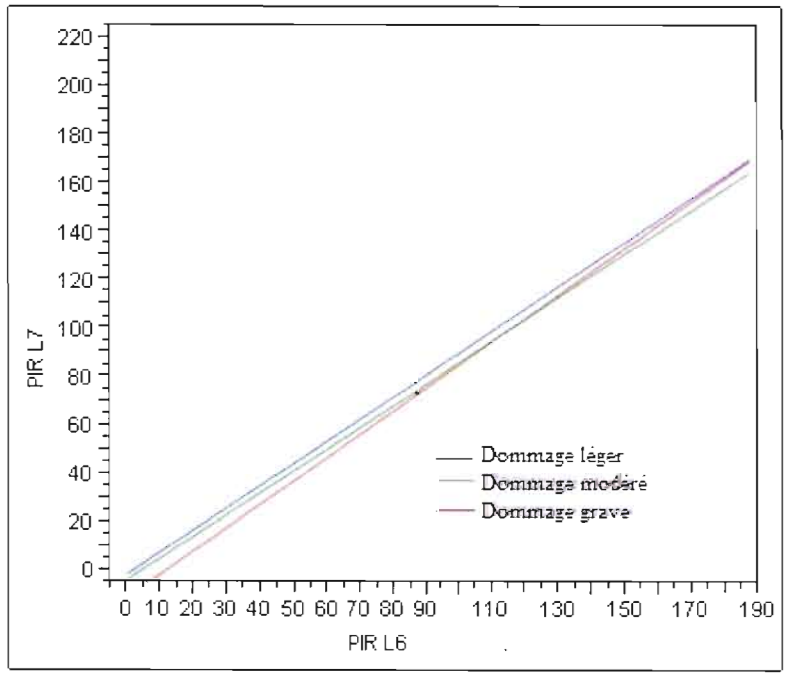

Figure 5.19 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L6 et L7.

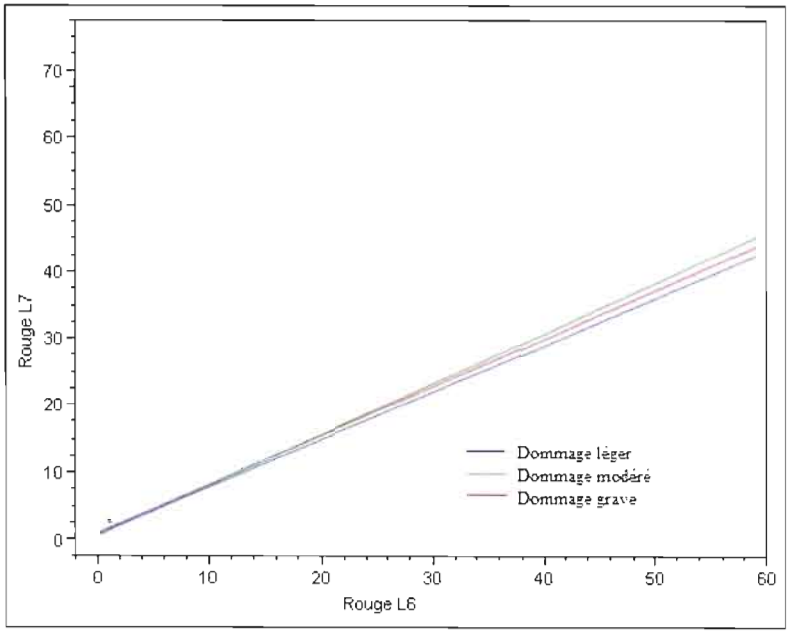

Figure 5.20 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L6 et L7.

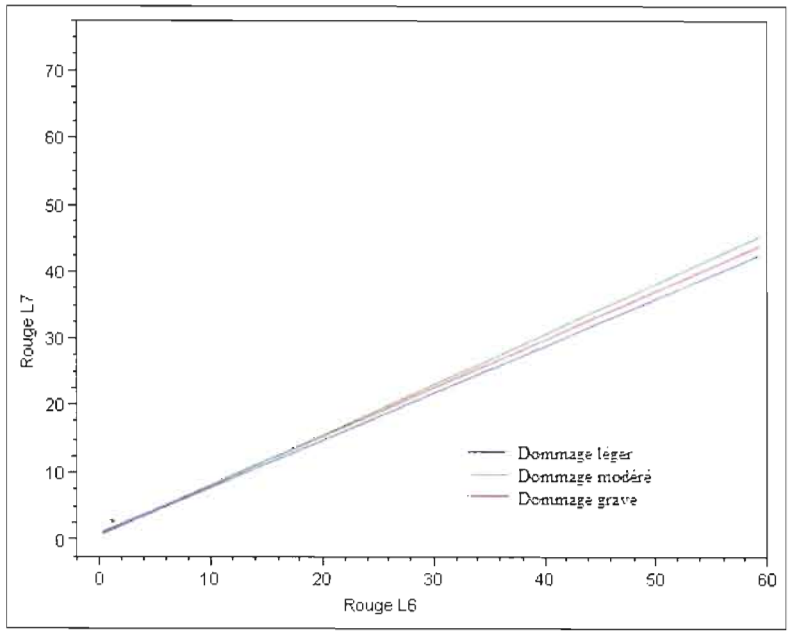

Figure 5.21 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L6 et L7.

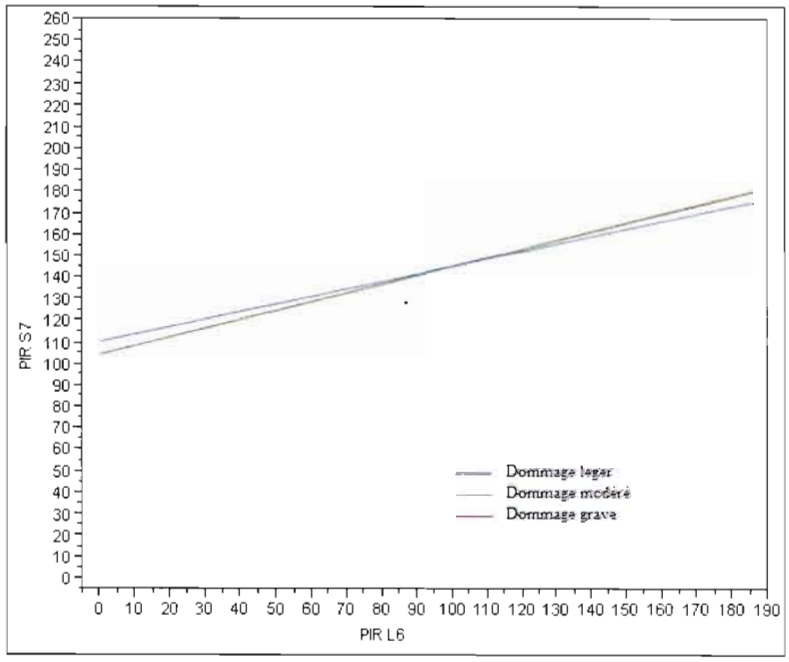

Figure 5.22 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L6 et S7.

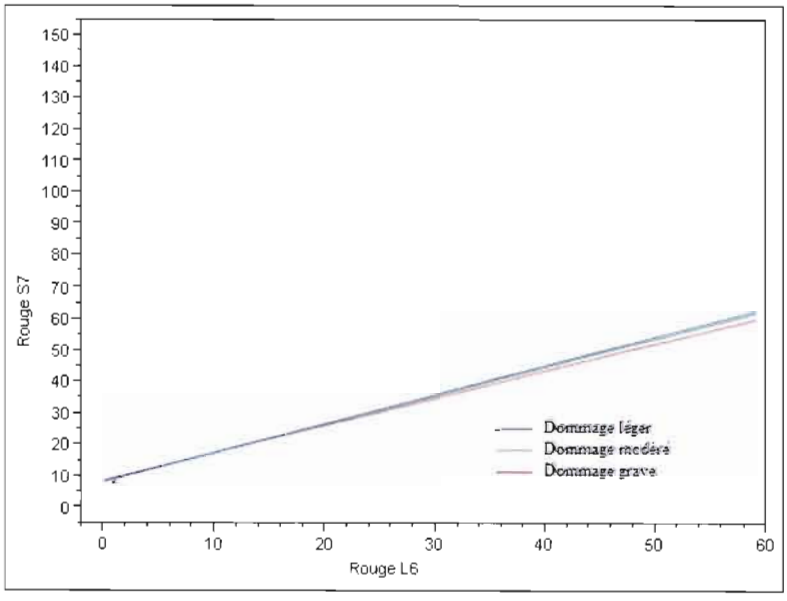

Figure 5.23 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L6 et S7.

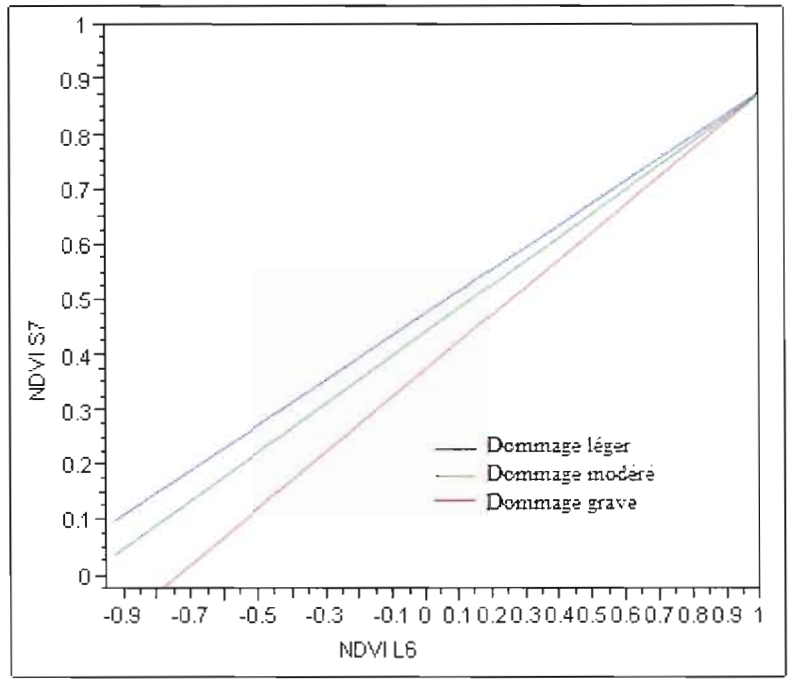

Figure 5.24 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L6 et S7.

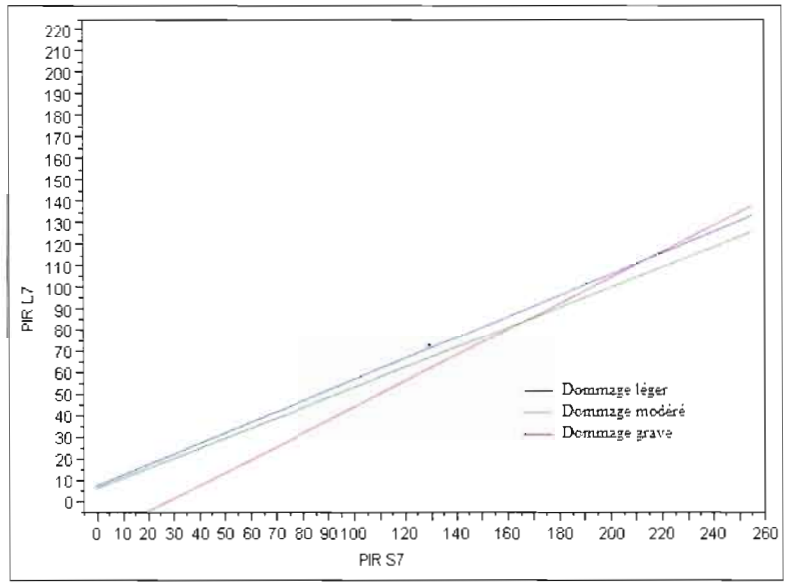

Figure 5.25 Graphique du test ANCOVA de la bande PIR de L7 et S7.

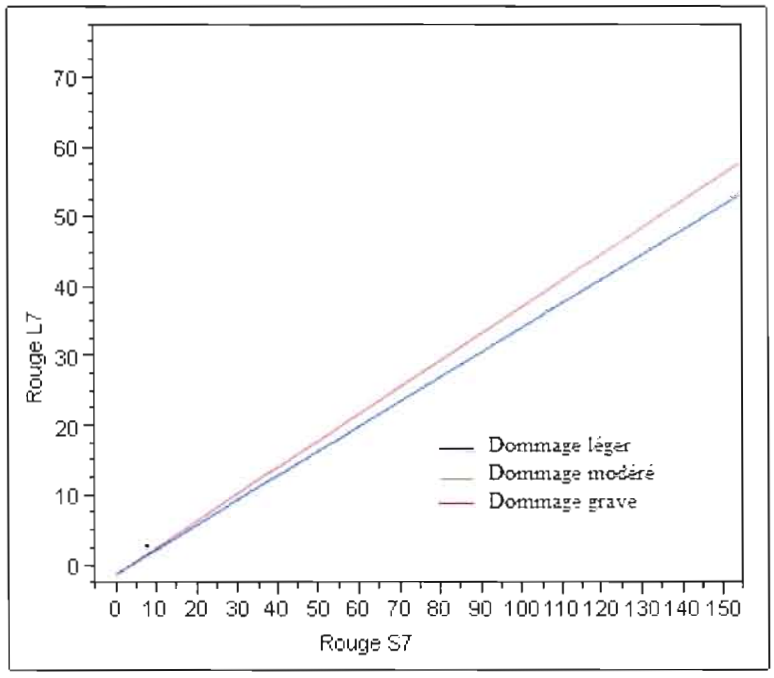

Figure 5.26 Graphique du test ANCOVA de la bande rouge de L7 et S7.

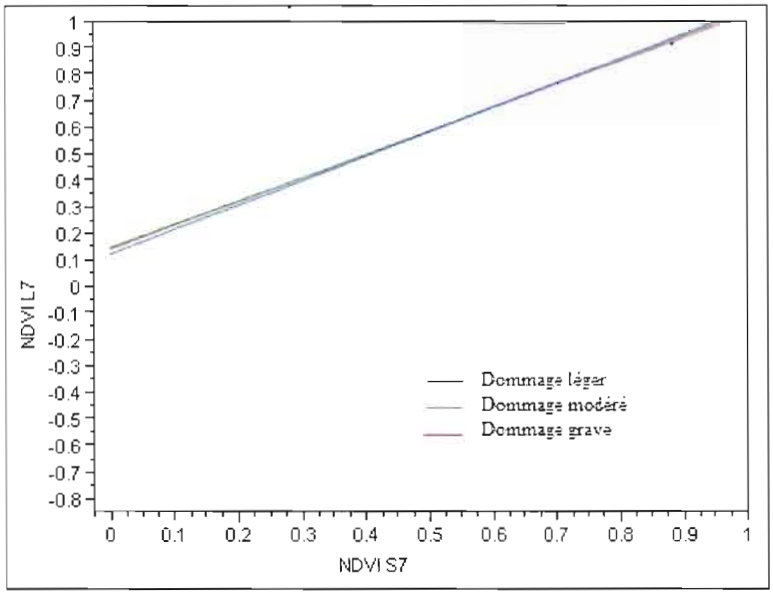

Figure 5.27 Graphique du test ANCOVA du NDVI de L7 et S7.

CHAPITRE VI

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

À travers ce chapitre, nous discuterons de nos divers résultats. Nous nous intéresserons principalement dans nos commentaires aux données obtenues après correction atmosphérique. Les résultats obtenus avant ou après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage sont donnés seulement à titre d'information et de comparaison.

6.1 Rappel de l'hypothèse centrale

Nous rappelons dans ce qui suit la principale hypothèse sur laquelle repose notre étude afin de discuter de celle-ci à la lumière des résultats obtenus.

L'hypothèse est la suivante : en théorie, si deux capteurs ont des bandes spectrales et des résolutions semblables, ils devraient permettre une détection des dommages aussi bonne que si deux images d'un même capteur avaient été utilisées. De plus, pour les rapports de bandes, on s'attend à une diminution de la valeur moyenne des pixels lorsque les dommages augmentent. La correction atmosphérique et la correction des effets du lignage devraient en principe améliorer nos résultats.

6.2 Discussion

En ce qui concerne les images L6 et L7, on devrait observer des contrastes entre les classes de dommages beaucoup plus grands en 2007 qu'en 2006. Pour l'image L7, on attend une diminution dans les PIR, VIN, NDVI, SAVI et une augmentation pour ce qui est du

rouge lorsque les dommages passent de légers à graves. Effectivement, dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5, on constate pour l'image L7 une diminution du PIR, du VIN et du SAVI. Pour ce qui est du rouge de L7, on observe que la moyenne des dommages graves est supérieure à celle des dommages légers, ce qui s'explique par la baisse de l'absorption de chlorophylle. Cependant, pour les dommages modérés, on constate une diminution du rouge par comparaison aux dommages légers, ce qui est contraire aux résultats attendus. Ce constat est d'ailleurs fait pour les trois niveaux de correction atmosphérique (avant et après correction atmosphérique, et après correction des effets du lignage). Concernant le NDVI de L7 indiqué dans le tableau 5.4, on constate qu'il est similaire au niveau des dommages légers et modérés, tandis qu'il est légèrement inférieur pour les dommages graves. Pour ce qui est des données obtenues soit avant correction atmosphérique, ou après correction atmosphérique et traitement des effets de lignage (Tableaux 5.3 et 5.5), le NDVI de L7 est tout à fait cohérent. Cependant, on observe que celui-ci diminue en fonction du degré de dommages; cette diminution se révèle forte dans le tableau 5.3 et faible dans le tableau 5.5.

En conclusion, les résultats du PIR de L7 prouvent que la relation entre le PIR et les différents degrés de dommages correspond au comportement spectral attendu de la végétation (selon que celle-ci est saine ou malade) expliqué au chapitre II. Les résultats du PIR pour L7 sont semblables à ceux observés par Vogelmann (1988) lorsqu'il a comparé les images LANDSAT MSS de 1973 et de 1984 dans une région montagneuse du Vermont. Cet auteur avait en effet remarqué entre ces deux années une diminution significative du PIR dans des sites fortement défoliés de pins rouges. Ce phénomène a aussi été observé par plusieurs auteurs (Koch *et al.*, 1990; Leckie *et al.*, 1992; Ekstrand,1994; Brockhaus *et al.*, 1994; Ardö, 1998; Leckie *et al.*, 2004) : des dommages légers correspondent à un PIR élevé et des dommages graves correspondent à un PIR moins fort..

Pour le rouge de L7, le fait que l'on observe une augmentation pour les dommages légers par comparaison aux dommages graves confirme ce que l'on a vu dans les résultats des études précédentes (notamment celles d'Ekstrand (1996) et de Leckie *et al.* (2004)), soit que la luminance de cette bande perçue depuis le satellite a tendance à augmenter avec le niveau de dommages. La diminution du rouge pour des dommages modérés nous montre, à notre

avis, que d'autres facteurs tels que la végétation herbacée, la densité des peuplements forestiers, l'exposition des versants boisés (vers le nord, le sud), l'angle d'incidence du satellite, la composition de l'atmosphère, ou encore l'inclinaison et l'intensité du rayonnement solaire, influencent la réflectance (sect. 2.2).

D'après les résultats du VIN de L7, on peut conclure que le ratio PIR/Rouge diminue lorsque l'intensité des dommages augmente. Ce phénomène a précédemment été observé par Boresjö (1993) d'après l'examen d'images multitemporelles MSS en vue de détecter des zones de déclin des conifères en Allemagne. Cet auteur a remarqué une légère diminution du ratio PIR/Rouge avec l'augmentation des dommages aux arbres (art. 3.3.1).

Les résultats du NDVI montrent par ailleurs que pour les zones légèrement et moyennement affectées, cet indice est significativement supérieur à celui des zones gravement affectées. Ce constat semble cohérent car le NDVI est un indice qui mesure la vitalité de la végétation. Mais l'exception reste pour les données obtenues après correction atmosphérique seulement (Tableau 5.4); dans ce cas, on remarque que la détection entre les dommages légers et modérés semble être difficile. Cette différence minime n'est toutefois pas due au hasard; l'application de l'ANOVA pour le NDVI de L7 (Tableau 5.11 et Figure 5.18) prouve en effet qu'il existe une différence significative ($P< 0,05$). Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, le deuxième élément marquant utile en vue d'expliquer cette situation se résume par la faible sensibilité du NDVI pour les forêts de conifères. Celle-ci est attribuée au peu de sensibilité de la réflectance dans le rouge entre hauts et bas niveaux de dommages pour ces essences, comme l'a constaté Vogelmann (1990) en comparant l'efficacité de deux indices. Cet auteur a conclu qu'en ce qui concerne le NDVI et le rapport SWIR/PIR pour les images LANDSAT TM, le NDVI est assez efficace pour les forêts feuillues, mais il l'est moins dans le cas des conifères (art. 3.3.1).

Du côté du SAVI, les mêmes interprétations que celles données pour le NDVI peuvent être reprises. Les résultats du SAVI, d'une part, nous confirment ceux du NDVI, et d'autre part, nous démontrent que le SAVI constitue seulement une modification du NDVI.

En d'autres termes, on ajoute seulement un paramètre caractérisant le sol, comme l'a expliqué Huette (1998; art. 4.4.2).

Concernant l'image L6, rappelons que les polygones de dommages appliqués pour le découpage sont ceux de l'année 2007; en théorie, on ne devrait donc pas constater de diminution ni d'augmentation des bandes et des rapports de bandes selon l'intensité des dommages. Mais les résultats présentés dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5 montrent deux éléments importants. Premièrement, on constate que les valeurs du PIR, du VIN, du NDVI et du SAVI de L6 obtenues par rapport aux degrés de dommages sont légèrement plus élevées que les valeurs des mêmes indices obtenues pour L7. Deuxièmement, on remarque une diminution ou une augmentation pour les bandes et les rapports de bandes quand on va des dommages légers aux dommages graves. On peut expliquer ces deux situations par une forte présence de peuplements sains en 2006 par comparaison à l'année 2007. Cela se traduit par une augmentation des valeurs des bandes et des rapports de bandes. Le fait que l'on observe une diminution ou une augmentation pour les bandes et les rapports de bandes de L6 quand on va des dommages légers aux dommages graves prouve également l'existence d'un degré de dommages, qui est toutefois minime par rapport à celui de 2007 (voir Tableau 4.1).

Les résultats relatifs à l'image S7, présentés dans les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5, montrent deux choses : tout d'abord, les valeurs des bandes sont plus élevées par comparaison à celles obtenues pour L6 et L7; ensuite, les différences entre les niveaux de dommages sont moins marquées par rapport aux résultats de L7. Pour le NDVI, on constate que les valeurs obtenues après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage demeurent similaires pour les trois niveaux de dommages (léger, modéré et grave). L'application de l'ANOVA pour le NDVI de S7 selon les degrés de dommages (voir Tableau 5.11 et Figure 5.18) montre qu'il existe une différence significative ($P < 0,05$). Donc, on peut reprendre les interprétations données pour le NDVI au niveau des dommages légers et modérés de L7, en rajoutant cependant que la différence observée pour le NDVI de S7, selon les degrés des dommages, est faible par rapport à celle obtenue dans le cas de L7.

L'interprétation des résultats pour les trois images après correction atmosphérique et traitement des effets du lignage (Tableau 5.5) demeure la même que celle des résultats obtenus après correction atmosphérique seulement, avec une légère différence au niveau des valeurs obtenues. Cela confirme que les corrections radiométriques et celles du lignage ont des effets variables, tantôt améliorant les contrastes entre les classes de dommages, tantôt les rendant moins clairs.

Dans cette partie de la discussion, on conclut que pour L7, les différences entre bandes et rapports de bandes sont bien marquées par rapport aux degrés de dommages. La capacité de détection des degrés de dommages de S7 est moins marquée que celle de L7. Pour L6, la présence de dommages minimes est observée, alors qu'on supposait au départ que la forêt en 2006 n'était pas encore perturbée. Cela nuit dans une certaine mesure à la comparaison multidates.

Enfin, d'après cette constatation, on peut affirmer que la généralisation cartographique a affecté nos résultats. Rappelons que le traçage des polygones de dommages établis par le MRNF est fait manuellement en observation visuelle (art. 4.3.3), donc il se peut qu'en traçant le haut des aires des polygones, on ait inclus par erreur des zones non endommagées dans les zones endommagées.

6.3 Comparaison des images

Pour faire une comparaison entre nos trois images, nous avons suivi les étapes suivantes :

- comparer deux capteurs (L7 et S7) d'après le même état de végétation;
- comparer d'après le même capteur (L7 et L6);
- comparer à l'aide de deux capteurs différents (L6 et S7);
- comparer des différences entre 2006 et 2007, selon deux paires de capteurs (L6 - L7 et L6 - S7).

Pour bien illustrer cette comparaison, on a calculé des coefficients de corrélation de toutes les bandes et des rapports de bandes des images citées plus haut selon le degré de dommages (Tableaux 5.6, 5.7 et 5.8).

Pour la comparaison entre les images L7 et S7, dans notre hypothèse, on suppose qu'on devra observer les mêmes comportements vu que ces images ont été prises la même année (autrement dit, les dommages observés devraient être les mêmes). Les différentes corrélations observées dans les tableaux 5.6, 5.7 et 5.8 montrent que les bandes et les rapports de bandes sont loin d'être corrélés à 100 %. Cependant, on remarque avant le filtrage que les images L7 et S7 sont corrélées entre elles dans le rouge à 57 %, au niveau de la bande PIR à 48 %, du NDVI à 61 %, du VIN à 36 % et du SAVI à 61 %. Après application des filtres moyens (3x3), on constate que le coefficient de corrélation augmente respectivement à 67 %, 58 %, 95 %, 57 % et 95 %. Cela révèle l'influence du bruit (atténuée par le filtrage) dans la corrélation entre les images.

Toujours dans le tableau 5.7, en comparant les deux images L6 et L7, on voit que la bande rouge et le PIR sont corrélés respectivement à 67 % et 81 % (avant le filtrage), et à 79 % et 88 % (après le filtrage). Pour les images L6 et S7, on remarque que les coefficients de corrélation de la bande rouge et de la bande PIR sont inférieurs à ceux observés entre les images L6 et L7. Il en va de même pour les indices. Concernant la comparaison après traitement des effets du lignage, les chiffres dans le tableau 5.8 montrent que les coefficients de corrélation sont inférieurs aux résultats présentés dans les tableaux 5.6 et 5.7.

D'après ces résultats, on peut conclure que le coefficient de corrélation des bandes et des rapports de bandes entre les deux capteurs identiques (LANDSAT) est supérieur à celui entre deux capteurs différents (LANDSAT-SPOT). On peut dire que la détection des changements peut mieux se faire à l'aide de deux capteurs identiques qu'à l'aide de deux capteurs différents.

6.4 Image de différence

Pour le calcul de la différence entre 2006 et 2007 et selon deux paires de capteurs (L6, L7 et L6, S7), on suppose qu'on devrait obtenir les mêmes changements. Une différence correspond à un changement, et par conséquent à des dommages. Dans le tableau 5.9, on constate que la différence selon l'intensité des dommages est bien observée pour le rouge, le PIR, le NDVI et le SAVI des couples (L6, L7) et (L6, S7). Font toutefois exception la différence du PIR du couple (L6, S7) de même que la différence du VIN du couple d'images (L6, L7), qui ne semble pas tout à fait cohérente. Cela est dû soit à la capacité faible du capteur S7 de détecter les degrés de dommages, soit à l'absence ou à la diminution du taux de dommages pour l'année 2006. Selon l'hypothèse citée plus haut, cette situation n'a pas rendu la différence entre les couples d'images (L6, L7) et (L6, S7) vraiment cohérente. Cela nous a incités à calculer la corrélation entre les différences des bandes et des rapports de bandes pour ces couples d'images en considérant tous les pixels de la zone d'étude des trois images (Tableau 5.10). Les résultats de cette analyse montrent qu'aucun coefficient de corrélation n'est supérieur à 50 % et ce, pour les trois niveaux de correction atmosphérique (avant et après correction atmosphérique, et après traitement des effets de lignage).

Enfin, d'après ce qu'on a cité plus haut, on peut dire que la détection des dommages selon un même capteur et à partir de deux dates différentes est possible, comme c'était le cas avec les images L6 et L7. La détection des changements avec deux capteurs différents ((L6, S7) et (L7, S7)) est par contre plus difficile.

CONCLUSION GÉNÉRALE

À travers ce mémoire, nous avons vérifié si l'analyse de couples d'images multitemporelles, provenant de différents capteurs qui comportent des bandes spectrales similaires (LANDSAT, SPOT, etc.), conduit à des résultats équivalents à ceux basés sur des images d'un même capteur.

La détection multitemporelle qu'on a opérée a été réalisée en utilisant deux images LANDSAT et une image SPOT. À travers le choix de ces images, nous avons présenté la détection de changements en suivant quatre étapes :

- la comparaison de deux capteurs (L7 et S7) d'après le même état de végétation;
- la détection des changements d'après le même capteur (L7 et L6);
- la détection des changements à l'aide de deux capteurs différents (L6 et S7);
- la comparaison des différences entre 2006 et 2007, selon deux paires de capteurs (L6 - L7 et L6 - S7).

Nous avons tenté de montrer à travers les différentes analyses dans quelle mesure le dommage est affecté par l'hétérogénéité des capteurs. Nos résultats indiquent que le couple LANDSAT-SPOT, bien qu'il permette de détecter des changements induits par les dommages, n'est pas aussi efficace que l'utilisation d'images multitemporelles provenant seulement de LANDSAT.

Pour les bandes et rapports de bandes des trois images, notre constatation générale est que le PIR répond à notre hypothèse d'étude. Cette hypothèse est plus adaptée au capteur LANDSAT qu'au capteur SPOT. Mais l'exception reste toujours la bande rouge et l'indice NDVI, qui répondent partiellement à cette hypothèse. Les faibles différences observées pour

les bandes et rapports de bandes selon le degré de dommages pour les trois images sont significativement différentes comme l'on démontré les tests statistiques.

De façon générale, d'après l'interprétation de nos différents résultats, on peut affirmer que les changements spectraux causés par le roussissement des aiguilles sont relativement subtils (contrairement à ceux d'un incendie de forêt, par exemple). Le fait d'introduire un facteur externe variable (deux capteurs différents) affecte beaucoup notre capacité à détecter les changements. En conséquence, les différences dans les conditions d'acquisitions (atmosphère, angle de visée des capteurs) peuvent affecter notre capacité de détection de façon importante.

En conclusion, bien que les différences entre les niveaux de dommages pour les classes légères, modérées et sévères soient statistiquement significatives pour L6 et S7, elles demeurent faibles. Conséquemment, la détection des changements causés par TBE à l'aide de deux capteurs différents demeure difficile; on peut se demander si SPOT a une sensibilité suffisante pour détecter les dommages subtils. Il faudra sans doute pousser plus loin l'étude des caractéristiques des capteurs, notamment au niveau de leur sensibilité (résolution radiométrique) et de l'effet de l'angle de visée. À priori, il serait préférable de lancer plusieurs satellites identiques (par exemple une nouvelle série LANDSAT) pour accroître la résolution temporelle par des passages plus fréquents que de miser sur la détection de changements d'après des capteurs différents.

BIBLIOGRAPHIE

Adams, J. B., D. E. Sabol, V. Kapos, R. Almeida, D. Roberts et A. Gillespie. 1995. « Classification of multispectral images based on fractions of endmembers - application to land-cover change in the Brazilian Amazon. » *Remote Sensing of Environment,* vol. 52, no 2, p. 137-154.

Agence spatiale algérienne. 2007. Satellite Alsat1. [En ligne]. [http ://www.asal-dz.org/articles/produit_details.php?id=57]. Page consultée le 19 janvier 2007.

Agence spatiale européenne. 2007. Satellite Envisat. [En ligne]. [http ://envisat.esa.int/]. Page consultée le 5 février 2007.

Ardö, J. 1998. « Remote Sensing of Forest Decline in the Czech Republic. » Thèse de doctorat, Lund, Sweden, Lund University Press, Box 141 S-221 00, 200 p.

Bariou, R., D. Lecanu et F. Le Henaff. 1985. *Dossier de télédétection: réponse spectrale des végétaux*. Rennes: Université de Rennes, vol. 2, 71 p.

Boresjö, L. 1993. « Multitemporal LANDSAT data for mapping and detection of forest damage. Experiences from a test area in Schwarzwald, West. » Germany Inventorying and monitoring endangered forests. *Proceedings*, IUFRO Conference. Zurich.

Boone, K., A. Galvin, N. M. Smith et S. J. Lynn. 2000. « Generalizing El Niño effects upon Maasai livestock using hierarchical clusters of vegetation patterns. » *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 66, no 6, p. 737-744.

Brockhaus, J. A., S. Khorram, R. I. Bruck, M. V. Campbell et C. Stallings. 1992. « A comparison of LANDSAT TM and SPOT HRV data for use in the development of forest defoliation models. » *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no 16, p. 3235-3240.

Caloz R., et C. Collet. 2001. *Précis de télédétection*, vol. 3, Québec : Presses de l'Université du Québec, p. 217-229.

Canada, Environnement Canada. 1999. *Bulletin d'information*, EDE n° 99-4.

Canada, Environnement Canada. 2009. *Normales et moyennes climatiques, Rapport de données quotidiennes de Port-Meunier de 1995 à 2005.* [En ligne]. [http ://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/hourlydata_f.html]. Page consultée le 6 juin 2009.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Photo de Dendroctone de l'épinette*, [En ligne]. [http ://foretscanada.rncan.gc.ca/articletend/165]. Page consultée le 24 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, Tordeuse des bourgeons de l'épinette.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecte-insect-fra.asp?geID=12018&ind=T.] Page consultée le 5 octobre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, Dendroctone de l'épinette.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecte-insect-fra.asp?geID=2819&ind=D.] Page consultée le 5 octobre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, Livrée des forêts.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecte-insect-fra.asp?geID=9374&ind=L]. Page consultée le 5 octobre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, Arpenteuse de la pruche.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecte-insect-fra.asp?geID=8846&ind=A]. Page consultée le 5 octobre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, photo d'Arpenteuse de la pruche.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/photo.asp?photo=010802&nomLatinFull=Lambdina%20fiscellaria&auteur=%28Guen%E9e%29&lang=fr&pest=i]. Page consultée le 4 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Photo de Dendroctone du pin ponderosa.* [En ligne]. [http ://foretscanada.rncan.gc.ca/articlesujet/138]. Page consultée le 24 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Photo de Tordeuse du pin gris.* [En ligne]. [http ://cfs.nrcan.gc.ca/fichesinformation/jpbudworm-tordeusepg.] Page consultée le 24 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Photo de Spongieuse.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecte-insect-fra.asp?geID=9506&ind=S.] Page consultée le 24 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada.2008. *Photo de Charançon du Pin Blanc.* [En ligne]. [http ://cfs.nrcan.gc.ca/soussite/charancon/about-apropos.] Page consultée le 24 septembre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Insectes et maladies des forêts du Canada, Charançon du Pin Blanc.* [En ligne]. [http ://imfc.cfl.scf.rncan.gc.ca/insecteinsectfra.asp?geID=1847&ind=C.] Page consultée le 5 octobre 2008.

Canada, Ressources naturelles Canada. 2008. *Photo du Diprion du Sapin.* [En ligne]. [http ://foretscanada.rncan.gc.ca/articletend/167.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Carter, G.A. 1993. « Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. » *American Journal of Botany,* vol. 80, no 3, p. 239-243.

CGCP. 1988. *The Canadian Global Change Program*, The Royal Society of Canada, Ottawa.

Chen, D., et W. Brutsaert. 1998. « Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over a tallgrass prairie. » *Journal of the Atmospheric Sciences,* vol. 55, no 7, p. 1225-1238.

Conseil canadien des ministres des Forêts. 2005. *Critères et indicateurs de l'aménagement durable des forêts au Canada, Bilan national*, Conseil canadien des ministres des forêts, 177 p.

Conseil canadien de géomatique GéoBase. 2008. [En ligne]. [http ://www.geobase.ca/geobase/fr/data/imagery/index.html.] Page consultée le 20 octobre 2008.

Coppin, P., I. Jonkheere, K. Nackaaerts, B. Muys et E.Lambin, 2004. « Digital change detection methods in ecosystem monitoring ». *International Journal of Remote Sensing,* vol. 25, no 9, p. 1565-1596.

Dai, X. et S. Khorram. 1998. «The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection». *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 36, no 5, p. 1566-1578.

Danks, H. V. 1988. Commission biologique du Canada (Arthropodes terrestres), p. 12.

Dorais, L., B. Boulet, A. Dupont et R. Gagnon. 2006. *Entomologie forestière, Manuel de foresterie.* Québec: Presses de l'Université Laval, p. 1009-1040.

Eckhardt, D. W., J. P. Verdin et G. R. Lyford. 1990. « Automated Update of an Irrigated Lands GIS Using SPOT HRV Imagery. » *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* vol. 59, no 11, p. 1515-1522.

Ekstrand, S. 1994. « Assessment of forest damage with LANDSAT TM-correction for varying forest stand characteristics. » *Remote Sensing of Environment*, vol 7, no 3, p. 291-302.

Ekstrand, S. 1996. « TM-based forest damage assessment : Correction for topographic effects. » *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, no 2, p. 151-161.

Falkenström, H. et S.Ekstrand. 2002. « Evaluation of IRS-1c LISS-3 satellite data for defoliation assessment on Norway spruce and Scots pine. » *Remote Sensing of Environment,* vol. 82, no 2 et 3, p. 208-223.

Franklin, S.E., M.A. Wulder, R.S. Skakun et A.L. Carroll. 2003. « Mountain pine beetle red-attack forest damage classification using stratified LANDSAT TM data in British Columbia, Canada. » *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* vol. 69, no 3, p. 283-288.

Garbutt, R. 1992. *Western Balsam Bark Beetle*. Forestry Canada. Pacific Forestry Centre, Victoria, B.C.: Forest Pest Leafl, 644 p.

Gillis, M. et D. Leckie. 1993. *Inventaire de forêt traçant des procédures à travers le Canada.* Sylviculture Canada, Rapport d'information de PNFI PI-X-114, 79 p.

Girard, M.C. et C.M. Girard. 1999. *Traitement des données de télédétection,* 530 p.

Gougeon, F.A. 1996. Chapitre 10 – « Télédétection numérique » *in Manuel de foresterie*, sous la dir. de J. Bérard. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Sainte-Foy (Qué.) : Les Presses de l'Université Laval, p. 539-569.

Guyot, G. 1984. « Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge ; application à la télédétection. » *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection,* no 95, p. 5-14.

Hagner, O. et O. Rigina. 1998. « Detection of forest decline in Monchegorsk area. » *Remote Sensing of Environment,* vol. 63, no 1, p. 11-23.

Horn, B. K. P. et R. J. Woodham. 1979. « Destriping LANDSAT MSS images by histogram modification. » *Computer Graphics and Image Processing*, vol.10, no 1, p. 69-83.

Huete, A. 1988. "A soil-adjusted vegetation index (savi)." *Remote Sensing of Environment,* 25, p. 295-309.

Huot, J. 1982. "Body condition and food resources of white-tailed deer on Anticosti Island, Quebec." Thèse de doctorat, Fairbanks, USA, University of Alaska.

Huot, J. 1978. «Études sur l'écologie du cerf de Virginie à l'Île d'Anticosti. » *Dans Atelier 1978 sur le cerf de Virginie,* sous la dir. de M. Morasse et M. Lépine. Port-Meunier (Québec) Ministère du tourisme, de la chasse et de la pêche, Direction de la recherche faunique.

Indian Space Research Organisation. Satellite IRS P6. 2008. [En ligne]. [http ://www.isro.org/pslvc5/index.html.] Page consultée le 20 janvier 2008.

Ives, W. H. G., et H. R. Wong. 1988. *Tree and shrub insects of the Prairie Provinces.* Information Report NOR-X-292. Edmonton (Alb.) : Centre de foresterie du Nord, Service canadien des forêts, 327 p.

Japan Aerospace Exploration Agency. 2007. Satellite Alos. [En ligne]. [http ://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html.] Page consultée le 16 janvier 2007.

Jensen, J., et D. Cowen. 1997. "Principles of change detection using digital remote sensor data." *In* : M. Estes (ed.), Integration of Geography Information System and Remote Sensing, London (England): Cambridge Press, p. 37-54.

Khorram, S., J.A. Brockhaus, R.I. Bruck et M.V. Campbell. 1990. « Modeling and multitemporal evaluation of forest decline with LANDSAT TM digital data ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no 4, p. 746-748.

Khorram, S., G. S. Biging, N. R. Chrisman, D. R. Colby, R.G. Congalton, J. E. Dobson, R. L. Ferguson, M. F. Goodchild, J. R. Jensen et T. H. Mace. 1999. *Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection.* Bethesda (MD): The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 64 p.

Knipling, E. 1970. «Physical and physiological bases for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation». *Remote Sensing of Environment* 1, p. 155-159.

Koch, B., U. Ammer, T. Schneider et H. Wittmeier. 1990. « Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. » *International Journal of Remote Sensing,* vol. 11, no 7, p.1145-1163.

Lambert, N. J., J. Ardo, B. N. Rock et J. E. Volgemann. 1995. « Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce stands in the Czech-republic using LANDSAT thematic mapper data. » *International Journal of Remote Sensing,* vol. 16, no 7, p. 1261-1287.

Leckie, D. G., C. Jay, F. A. Gougeon, R. N. Sturrock et D. Paradine. 2004. « Detection and assessment of trees with *Phellinus weirii* (laminated root rot) using high resolution multi-spectral imagery ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no 4, p. 793-818.

Leckie, D.1996. *Info-Forêts*. Bulletin d'information du Centre forestier du Pacifique, avril 2006.

Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio et E. Moran. 2004. « Change detection technique. » *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no 12, p. 2365.

Martineau, R. 1985. *Insectes nuisibles des forêts de l'est du Canada.* Laprairie (Québec) : Éditions Marcel Broquet, 283 p.

Mas, J.F. 2000. « Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. » *Journal canadien de télédétection,* vol. 26, no 4, p. 349-362.

National Aeronautics and Space Administration. 2007. Satellite Modis. [En ligne]. [http ://modis.gsfc.nasa.gov/.] Page consultée le 21 janvier 2007.

National Aeronautics and Space Administration. 2007. Satellite Aster. [En ligne]. [http ://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp.] Page consultée le 24 janvier 2007.

NOAA National Climate Data Center. Guide utilisateur des Indices Globaux de Végétation (GVI) du Centre National des Données Climatiques NOAA. [En ligne]. [http ://www.wmo.int/pages/prog/sat/CGMS/Directoryofapplications/fr/ap4-06.htm.] Page consultée le 10 octobre 2008.

Potvin, F. 1992. « L'habitat du cerf à Anticosti de 1978 à 1988: suivi quinquennal. » Rapport SP 1925-02-92, Québec (Qué) : Direction générale de la ressource faunique, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche.

Potvin, F., P. Beaupré, A. Gingras et D. Pothier, 2000. *Le cerf et la sapinière de l'Île d'Anticosti. Direction de la faune et des habitats.* Société de la faune et des parcs du Québec, QC, Canada, 35 p.

Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2008. *Le bilan annuel 2007 des insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises.* Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec, 2008 ISSN: 1703-5589, ISBN. [En ligne]. [www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/fimaq/insectes/bilan2007.pdf]

Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. 2008. *Photo de Tordeuse des bourgeons de l'épinette.* [En ligne]. [http ://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-tordeuse.jsp.] Page consultée le 24 septembre 2008.

Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. 2008. *Photo de Livrée des forêts* [En ligne]. [http ://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-livree.jsp.] Page consultée le 17 juin 2008.

Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. 2008. *Aires défoliées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec en 2008*, p. 32.

Richards, J.A. et X. Jia. 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis (4th Edition)*, ISBN 354-0251-286, 476 p.

Satellite SPOT 5. 2007. [En ligne]. [http ://www.spotimage.fr/html/_.php] Page consultée le 15 janvier 2007.

Satellite JERS-1. 2008. [En ligne]. [http ://eoedu.belspo.be/fr/satellites/jers.htm.] Page consultée le 25 août 2008.

Satellite LANDSAT 5. 2008. [En ligne]. [http ://landsat.gsfc.nasa.gov/about/technical.html.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite LANDSAT 7. 2008. [En ligne]. [http ://landsat.gsfc.nasa.gov/about/technical.html.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite SPOT 4. 2008. [En ligne]. [http ://spot4.cnes.fr/spot4_fr/index.htm.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite IRS-1C. 2008. [En ligne]. [http ://ceos.cnes.fr :8100/cdrom-98/ceos1/isro/eospro/irs1c.htm.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite IRS-1D. 2008. [En ligne]. [http ://ceos.cnes.fr :8100/cdrom-98/ceos1/isro/eospro/irs1c.htm.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite JERS-1. 2008. [En ligne]. [http ://eoedu.belspo.be/fr/satellites/jers.htm.] Page consultée le 20 août 2008.

Satellite LANDSAT TM 5. 2008. [En ligne]. [http ://landsat.gsfc.nasa.gov/about/technical.html.] Page consultée le 18 septembre 2008.

Satellite LANDSAT 7. 2008. [En ligne]. [http ://landsat.gsfc.nasa.gov/about/technical.html.] Page consultée le 20 septembre 2008.

Satellite SPOT 4. 2008. [En ligne]. [http ://spot4.cnes.fr/spot4_fr/index.htm.] Page consultée le 10 octobre 2008.

Satellite IRS-1C. 2008. [En ligne].
[http ://ceos.cnes.fr :8100/cdrom-98/ceos1/isro/eospro/irs1c.htm.] Page consultée le 25 septembre 2008.

Satellite IRS-1D. 2008. [En ligne].
[http ://ceos.cnes.fr :8100/cdrom-98/ceos1/isro/eospro/irs1c.htm.] Page consultée le 5 novembre 2008.

Singh, A. (1989) "Digital change detection techniques using remotely-sensed data : Review article." *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, no 6, p. 989-1003.

Skakun, R. S., M. A. Wulder et S. E. Franklin. 2003. « Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. » *Remote Sensing of Environment,* vol. 86, no 4, p. 433-443.

Souza, C., L. Firestone, L. M. Silva et D. Roberts. 2003. « Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from Spot 4 through spectral mixture models ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, no 4, p. 494-506.

Tanré D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman et J. J. Morcrette. 1990. "Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code." *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no 4, p. 659-668.

Tremblay, J.-P., J. Huot et F. Potvin. 2005. "Relation entre les perturbations induites par les cervidés et la dynamique de régénération des écosystèmes forestiers boréaux. Functional relationship linking cervids density to the ecological integrity of ground plant communities in a boreal forest." Thèse de doctorat, Sainte-Foy, QC, Université Laval.

Radeloff, V. C., D. J. Mladenoff et M. S. Boyce. 1999. « Detecting jack pine budworm defoliation using spectral mixture analysis : Separating effects from determinants. » *Remote Sensing of Environment,* vol. 69, no 2, p. 156-169.

Radke, R., S. Andra, O. Al-Kohafi et B. Roysam. 2005. « Image change detection algorithms: A systematic survey ». *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, no 3, p. 294-307.

Rahman, H., et G. Dedieu. 1994. « SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum. » *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, no 1, p. 123-143.

Rose, A. H., et O. H. Lindquist. 1994. *Insectes des épinettes, du sapin et de la pruche de l'est du Canada.* Ottawa : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, et Groupe Communication Canada. Édition révisée. 159 p.

Rose, A.H., et O.H. Lindquist. 1997. *Insectes des feuillus de l'est du Canada.* Ottawa : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, édition révisée. Rapport technique de foresterie 29F, 304 p.

Rose, A. H., O. H. Lindquist et K. L. Nystrom. 1999. Insectes des pins de l'est du Canada. Ottawa : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Édition révisée. Publ. 1313 F, 128 p.

Vogelmann, J. E. 1988. « Detection of forest change in the green mountains of Vermont using multispectral scanner data. » *International Journal of Remote Sensing,* vol. 9, no 7, p. 1187-1200.

Vogelmann, J. E. 1990. « Comparison between 2 vegetation indexes for measuring different types of forest damage in the north-eastern United States ». *International Journal of Remote Sensing,* vol. 11, no 12, p. 2281-2297.

Wastensson, L., G. Alm, J. Kleman et B. Wastensson. 1988. « Swedish experiences of forest damage inventory by remote sensing. Proceedings. » *Seminar on Remote Sensing of Forest Decline Attributed to Air Pollution*, p.16-31.

Wikipédia, Encyclopédie, éd. 2008. [En ligne]
[http ://fr.wikipedia.org/wiki/Dendroctone_du_pin_ponderosa.] Page consultée le 07 octobre 2008.