

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE
EN RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR

CLAUDE PELLETIER, B.Sc. Biologie

MÉTHODOLOGIE DE DÉTECTION DES FEUX DE FORÊT
À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES NOAA

Juillet 2001



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Une grande partie du territoire québécois n'est pas couverte par la stratégie de détection des feux de forêt de la Société de protection des forêts contre le feu. L'utilisation d'images satellitaires permettrait d'avoir un portrait de la situation des feux sur l'ensemble du territoire. Une technique de détection et de suivi des feux de forêt pourrait être intéressante pour les secteurs éloignés situés dans la zone de protection restreinte au nord du 51^{ème} parallèle nord. L'objectif de cette étude est d'améliorer l'arsenal pour la lutte contre les feux de forêt. La méthode développée dans cette étude compare la luminance mesurée par les canaux 3 et 4 du capteur AVHRR au-dessus des feux de forêt. Pour vérifier la capacité et l'efficacité de ce traitement à détecter des feux de forêt, les images-résultats ont été comparées avec les cartes de localisation des feux de forêt tracées à partir des données fournies par la direction de la conservation des forêt du ministère des Ressources naturelles du Québec. Bien que les données brutes des canaux 3 et 4 fournissent des informations intéressantes sur la répartition des feux, le traitement des images développé au cours de cette étude permet de mieux mettre en évidence les feux par rapport au reste de l'image. En plus de la détection des feux, la méthode permet aussi d'évaluer leur intensité et leur direction. Le traitement des images satellitaires a permis de détecter 62 % des feux de plus de 10 ha qui n'étaient pas couverts par des nuages. Le plus petit feu de forêt détecté avec la méthode est un feu de 20 hectares. Même si la méthode n'a pas permis de détecter tous les feux présents, elle fournit néanmoins une information des plus précieuses puisqu'aucun autre moyen présentement disponible ne permet d'avoir un portrait de chaque kilomètre carré du territoire plusieurs fois par jour et ce, à un coût comparable à celui des images satellitaires.

REMERCIEMENTS

C'est avec un très grand plaisir que je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont permis de mener à bien la réalisation de ce projet. Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche Monsieur Gilles-H Lemieux. En plus de m'avoir accueilli dans son laboratoire Monsieur Lemieux a toujours répondu présent lorsque j'ai eu besoin de lui. Merci pour la patience dont il a toujours fait preuve.

Je désire aussi accorder un remerciement particulier à André Arsenault qui a agi comme maître à penser dans le cadre de ce projet. André a su alimenter ma réflexion et pourvoir aux connaissances en physique et en informatique qui me faisaient défaut. Merci aussi à Daniel et Raymond Bégin qui en plus d'être frères, partagent la caractéristique d'être des êtres d'une rare érudition. Je me sens privilégié d'avoir eu le privilège de faire partie de l'équipe du laboratoire de télédétection constitué par ces trois « télédéTECTives ».

Finalement, je tiens à remercier le consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale qui m'a offert un support financier au cours de cette aventure.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	iv
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	8
2.1 La région étudiée	9
2.2 Les données.....	11
2.2.1 <i>Les satellites TIROS-N de la NOAA</i>	13
2.2.2 <i>Les feux de la saison 1997</i>	15
2.3 Considérations physiques	16
2.4 Rehaussement des images.....	19
2.5 Analyse des données satellitaires	21
2.5.1 <i>Extraction et préparation des images pour le traitement</i>	21
2.5.2 Traitement des images pour l'identification des feux	25
CHAPITRE 3: RÉSULTATS.....	31
3.1 Images-résultats du traitement pour l'identification des feux de forêt.....	32
3.2 Comparaison des images-résultats avec les données de la direction de la conservation des forêts.....	37
CHAPITRE 4: DISCUSSION	41
CHAPITRE 5: CONCLUSION.....	47
RÉFÉRENCES	49

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 : Zones d'intervention dans le programme de protection des forêts contre le feu.....	4
Figure 2.1 : Région étudiée	10
Figure 2.2 : Schématisation de la chaîne de réception d'images satellitaires du laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi.	12
Figure 2.3 : luminance spectrale d'un corps noir à différentes températures	16
Figure 2.4 : Valeur radiométrique des pixels d'une section de la ligne 67 de l'image du 20 juin 1996.	18
Figure 2.5 : Aperçu de l'image NOAA-14 du 31 juillet 1997.	23
Figure 3.1 : Sous-scène de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT	33
Figure 3.2 : Canaux 3 et 4 couvrant la zone d'étude pour l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT	34
Figure 3.3 : Image-résultat du traitement pour l'identification des feux de forêt de la zone d'étude de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT.....	35
Figure 3.4 : Canaux 3, 4 et résultat de la partie nord-ouest de la zone d'étude de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT.....	36
Tableau 2.1 : Longueur d'onde des cinq canaux du capteur AVHRR.....	14
Tableau 3.1 : Nombre de feux de forêt dans la zone d'étude.....	38
Tableau 3.2 : Nombre de feux non couverts par les nuages par rapport au nombre total de feux	39
Tableau 3.3 : Nombre de feux identifiés à l'aide des images satellitaires et de la méthode de traitement par rapport au nombre total de feux	39
Tableau 3.4 : Nombre de feux identifiés à l'aide des images satellitaires et de la méthode de traitement par rapport au nombre de feux qui étaient visibles.....	39

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Ravageant de grandes superficies annuellement, les feux de forêt constituent une préoccupation majeure pour les gestionnaires de la forêt québécoise. Pour la décade de 1989 à 1998, une moyenne annuelle de 840 feux ont brûlé une superficie moyenne de 960 000 hectares (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1997; Société de protection des forêts contre le feu, 1999). Les coûts annuels associés au combat de ces incendies varient en fonction du nombre, de la superficie et de l'accessibilité des feux. En 1994, par exemple, les dépenses associées au combat des incendies ont été de 34 millions de dollars alors qu'en 1995, la facture s'élevait à 75 millions (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1997). En 1997, la saison des feux a été peu active par rapport aux autres saisons. Bien que le nombre de feux (876) se trouve près de la moyenne (840), la superficie de forêts brûlées en 1997 (393 000 hectares) est très inférieure à la moyenne annuelle (960 000 hectares) (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1997).

L'obtention du maximum d'information sur la répartition spatiale et temporelle des feux est indispensable pour leur gestion et aussi pour la compréhension de la dynamique de

la forêt boréale. Beaucoup d'efforts sont donc consentis au Québec par la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) afin de détecter les nouveaux feux le plus rapidement possible et de les combattre avant qu'ils ne s'étendent et ne deviennent impossibles à circonscrire.

Le territoire québécois a été divisé en deux zones d'interventions dans le programme de protection des forêts contre les feux (Figure 1.1). D'abord, la zone de protection intensive qui couvre l'ensemble de la forêt commerciale québécoise s'étend du sud du Québec jusqu'aux environs du 51^{ème} parallèle nord. La deuxième zone, appelée zone de protection restreinte, couvre quant à elle la partie du territoire de la province de Québec situé au nord de la zone de protection intensive. La zone de protection intensive est sous la responsabilité de la SOPFEU alors que la zone de protection restreinte est sous la responsabilité de la direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles du Québec.



Figure 1.1 : Zones d'intervention du programme de protection des forêts contre le feu

Le système de détection aérien de la SOPFEU couvre l'ensemble de la zone de protection intensive. La détection des feux se fait principalement par des vols de reconnaissance. Plus d'une trentaine d'avions sillonnent la zone de protection intensive à des fréquences établies en fonction des indices de danger d'incendie et des prévisions météorologiques. Chaque avion est muni d'un émetteur-récepteur et d'un système de positionnement par satellite. Le pilote de l'avion ayant localisé un incendie transmet la

position, la superficie, l'intensité et la progression de l'incendie au centre provincial de détection. La SOPFEU peut aussi compter sur la collaboration du public qui l'avise lorsqu'un feu débute dans une zone habitée. L'organisme de protection des forêts contre le feu dispose aussi de certaines autres informations de types météorologiques comme la température, les prévisions de pluies, les vents, l'humidité relative et aussi des informations un peu plus spécialisées comme les indices d'inflammabilité. De plus, comme la foudre est responsable de l'allumage de 27 % des feux et que les feux allumés par la foudre brûlent 74 % de la superficie (Ministère des Ressources naturelles du Québec 1997), il est primordial de connaître l'endroit et le moment où elle frappe. Un réseau de capteurs automatisés saisit l'emplacement et le nombre des points d'impacts de la foudre avec le sol ce qui fournit une information supplémentaire à la SOPFEU (Société de protection des forêts contre le feu 1999)

Des systèmes d'informations à référence spatiale peuvent être très utiles pour différents aspects de la problématique de la gestion des feux (Chuvieco et Martin 1994 a). L'utilisation d'images satellitaires pour la détection des feux de forêt est peu coûteuse et permet d'avoir un portrait de la situation des feux sur l'ensemble du territoire (French et al. 1995; Kaufman et al. 1991). D'abord, ces systèmes peuvent contribuer à la planification des activités de contrôle en permettant une meilleure organisation des ressources matérielles et humaines. Cette première phase d'utilisation des informations satellitaires permet d'évaluer les variables étroitement reliées à l'allumage et à la croissance des feux. Parmi ces variables, se retrouvent entre autres, l'état de la matière organique accumulée et pouvant

servir de combustible, la valeur des secteurs à protéger, les données climatiques et les informations topographiques. La seconde phase d'utilisation des informations satellitaires est liée à la gestion du feu : détection, suppression et cartographie du secteur brûlé (Chuvieco et Martin 1994 b).

Puisque les gestionnaires de la forêt québécoise ont défini une zone de protection intensive où sont concentrés les efforts de détection et de répression, une partie du territoire de la forêt boréale québécoise reçoit une attention minimale de la part des autorités. Une technique de détection et de suivi des feux de forêt pourrait donc être intéressante pour ces secteurs éloignés. L'utilisation d'informations spatiales pour localiser les feux de forêt et en faire le suivi peut aussi compléter les systèmes conventionnels de détection des zones de protection intensives (Flannigan et Vonder Haar 1986). Cependant, l'information spatiale doit être considérée comme un outil supplémentaire, et non pas un moyen de remplacer les moyens actuels de détection des feux (Belward et al. 1994).

Flannigan et Vonder Haar (1986) mentionnent que des satellites environnementaux comme les satellites TIROS-N de la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* constituent des outils économiques intéressants pour suivre l'activité des feux de forêt.

L'objectif général de cette étude est donc d'améliorer l'arsenal pour la détection et la lutte contre les incendies forestiers afin d'améliorer l'utilisation des ressources humaines,

financières et matérielles. À partir de cet objectif général, certains objectifs particuliers sont poursuivis soit : 1) développer une méthode automatisée de traitement d'images satellitaires NOAA pour la détection des feux de forêt 2) déterminer l'efficacité de cette méthode en comparant les résultats obtenus avec les informations transmises par la direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles du Québec et 3) déterminer la surface minimale qu'un feu doit avoir pour qu'il puisse être détectable par les capteurs thermiques des satellites NOAA dans le contexte de cette recherche.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 La région étudiée

La région retenue pour l'étude (Figure 2.1) comprend la portion de la province de Québec incluse entre les parallèles 48 et 51 Nord et les méridiens 64 et 80 ouest. Cette région de la forêt boréale couvre environ 50 000 000 d'hectares ou 500 000 kilomètres carrés. La végétation de la région d'étude est caractéristique de la forêt boréale. Elle est principalement constituée de pessière noire à mousse et de pessière noire à sapin et à mousse. La région étudiée comprend aussi la forêt mixte bordant au sud la région du Saguenay—Lac-St-Jean. La figure 2.1 permet aussi de constater que la région comporte plusieurs rivières et une multitude de lacs. Certains grands lacs constituent des repères géographiques intéressants entre autres, le réservoir Manicouagan au nord, le lac Mistassini et le lac Albanel au nord-ouest, le réservoir Gouin à l'ouest et le lac Saint-Jean au sud.

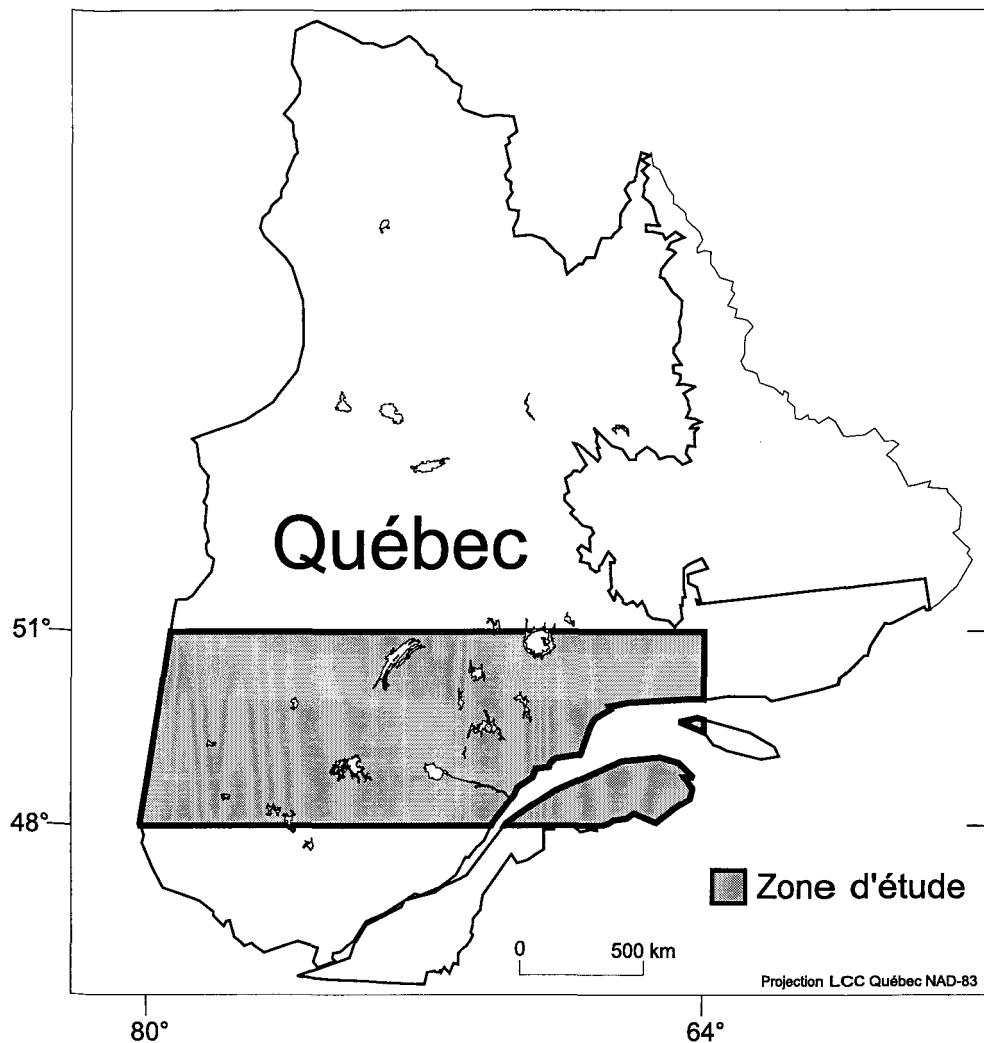


Figure 2.1 : Région étudiée

Cette partie du territoire de la province de Québec a été retenue parce qu'elle est peu occupée par l'Homme. En limitant la présence d'infrastructures humaines, par exemple de grandes villes importantes ou des secteurs industriels, il était possible de limiter les risques de confusion des points chauds d'origine anthropiques avec les feux (Dozier 1981).

2.2 Les données

La saison de feu de l'année 1997 a été retenue puisque toutes les informations nécessaires au développement de la méthode étaient disponibles au début de la phase expérimentale de l'étude au cours de l'été 1998. Les données satellitaires et les données forestières utilisées pour cette étude couvrent la période du mois de mai au mois d'août de l'année 1997.

Les données du satellite NOAA-14 utilisé pour cette étude ont été acquises par la station de réception d'image satellitaire (STAR/IMSAT) du laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi. Depuis 1995, le laboratoire de télédétection opère de façon automatisée et en continue une chaîne de réception quotidienne des satellites TIROS de la NOAA (Figure 2.2). Les images satellitaires sont captées par une antenne parabolique motorisée dont le déplacement est supervisé par un ordinateur de pointage et de suivi. Par la suite, les images sont transmises via le réseau informatique à une station d'archivage qui place l'image reçue sur un ruban magnétique. Les images archivées peuvent ensuite être extraites de l'archive et traitées en fonction des besoins et des spécifications de l'utilisateur.

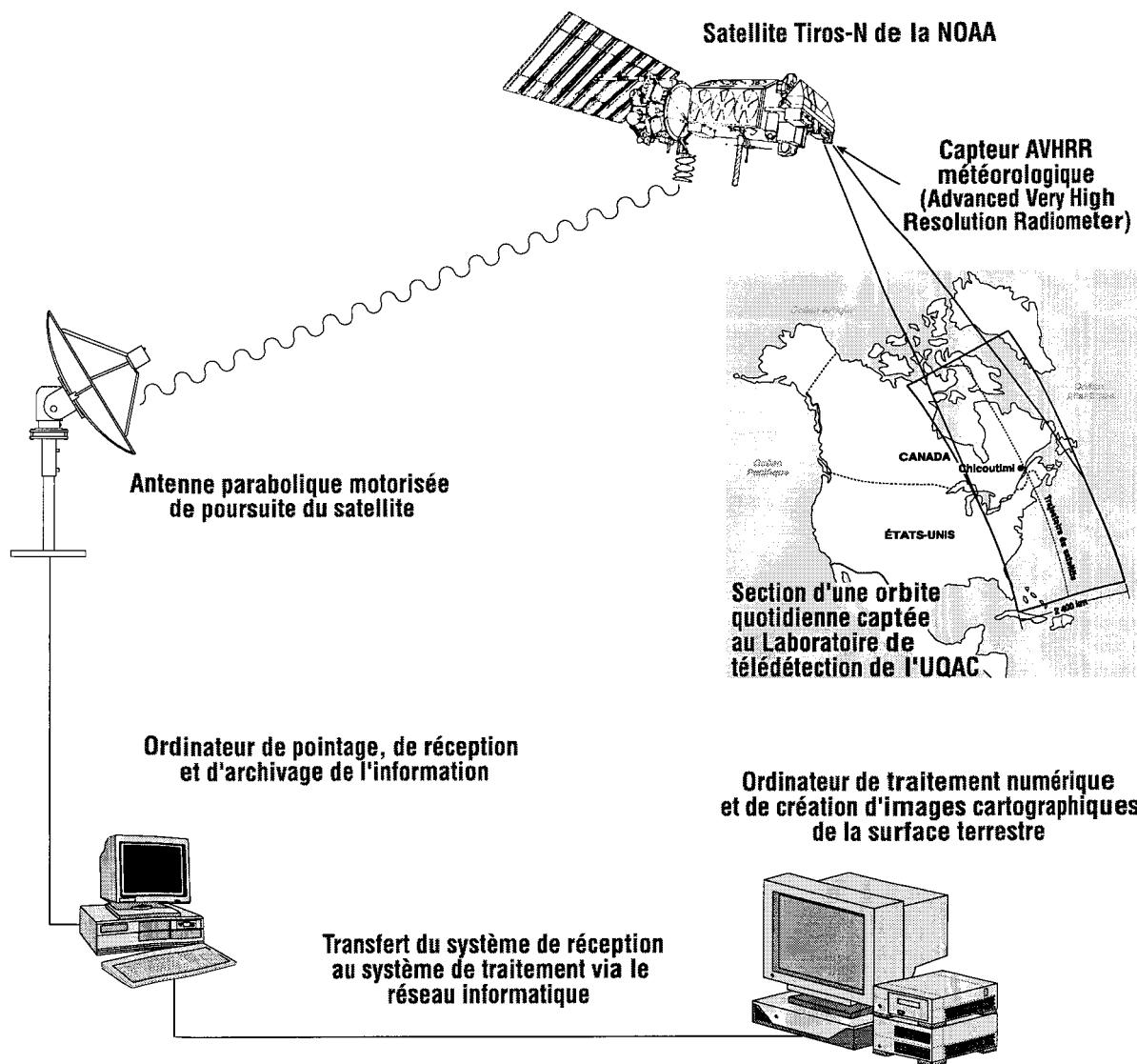


Figure 2.2 : Schématisation de la chaîne de réception d'images satellitaires du laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi.

2.2.1 Les satellites TIROS-N de la NOAA

Le lancement de TIROS-N en 1978 a marqué le début de la troisième génération des satellites à orbite polaire. L'expertise acquise par la *National Aeronautical Space Administration* (NASA) lors du développement de ce satellite a par la suite permis à la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de développer une série de satellites comme NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8 et NOAA-9 qui ont graduellement été remplacés par d'autres satellites du même type. Dans le cadre de cette étude, les données recueillies par le satellite NOAA-14 ont été utilisées.

Les satellites du type TIROS-N de la NOAA ont été conçus pour opérer sur une orbite polaire et héliosynchrone à une altitude de 834 km. Leur période orbitale est de 102 minutes ce qui leur permet de faire 14 fois le tour de la terre en une seule journée. Ces satellites ont une couverture au sol de l'ordre de 2 400 kilomètres de largeur et une résolution au nadir de 1,1 km. Les satellites TIROS-N sont équipés de plusieurs capteurs. Pour réaliser cette étude, les images provenant de l'*Avanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) ont été utilisées. Le capteur AVHRR, qui est monté à bord des satellites NOAA depuis 1979, offre un canal dans le domaine des longueurs d'ondes visibles, un canal dans le domaine des longueurs d'ondes proche infrarouge et trois canaux dans le

domaine des longueurs d'ondes thermiques. Le tableau 2.1 indique les longueurs d'ondes de chacun des canaux du capteur AVHRR.

Tableau 2.1 : Longueurs d'onde des cinq canaux du capteur AVHRR

Canaux	Longueur d'onde (μm) ¹		
Canal 1	0,580	-	0,680
Canal 2	0,725	-	1,100
Canal 3	3,550	-	3,930
Canal 4	10,300	-	11,300
Canal 5	11,500	-	12,500

1 : Source : Malingreau, 1990

Une description plus avancée des satellites de type TIROS-N et du capteur AVHRR est disponible dans le *NOAA Polar Orbiter Users Guide* (Kidwell 1998).

2.2.2 Les feux de la saison 1997

Les informations sur les feux de forêt, comme la localisation, la superficie et la date d'allumage, ont été obtenues de la Direction de la conservation des forêts du ministère de Ressources naturelles du Québec. Les informations reçues couvrent l'ensemble des 876 feux de forêt ayant eu lieu en 1997, le premier feu ayant débuté à 17:00 heures le 15 avril 1997 et le dernier feu ayant été contrôlé ou éteint le 26 octobre à 16:15 heures. Les informations sur les feux permettent entre autres de connaître pour chacun des feux les coordonnées exactes en longitude et en latitude, les dates d'allumage et d'extinction, la superficie, la cause (humaine, foudre, etc.) et les ressources qu'il a été nécessaire de déployer pour les contrôler. La localisation et la détermination de la taille des feux sont habituellement réalisées par des survols en début de matinée ou en fin de journée. Puisque la fumée et les conditions atmosphériques peuvent être défavorables pour déterminer la taille des feux et leur localisation exacte, il y a un certain niveau d'incertitude pour ces informations (Flannigan et Vonder Haar 1986). De plus, l'heure du début de l'incendie est fixée au moment où le feu est déclaré aux agences de protection des forêts; aussi un certain degré d'incertitude est donc présent à ce niveau et il faut en tenir compte lors de la vérification de la précision de la méthode développée dans le cadre de cette recherche.

2.3 Considérations physiques

La loi de Planck énonce que tous les objets ayant une température supérieure au zéro absolu émettent une radiation électromagnétique et que la température de l'objet détermine la quantité d'énergie émise à une longueur d'onde donnée. La loi de Stefan-Boltzmann indique quant à elle que l'émittance d'un objet augmente lorsque sa température augmente (Holman 1986). La loi de Wien précise que la longueur d'onde du maximum d'émittance varie comme l'inverse de la température absolue (Holman 1986).

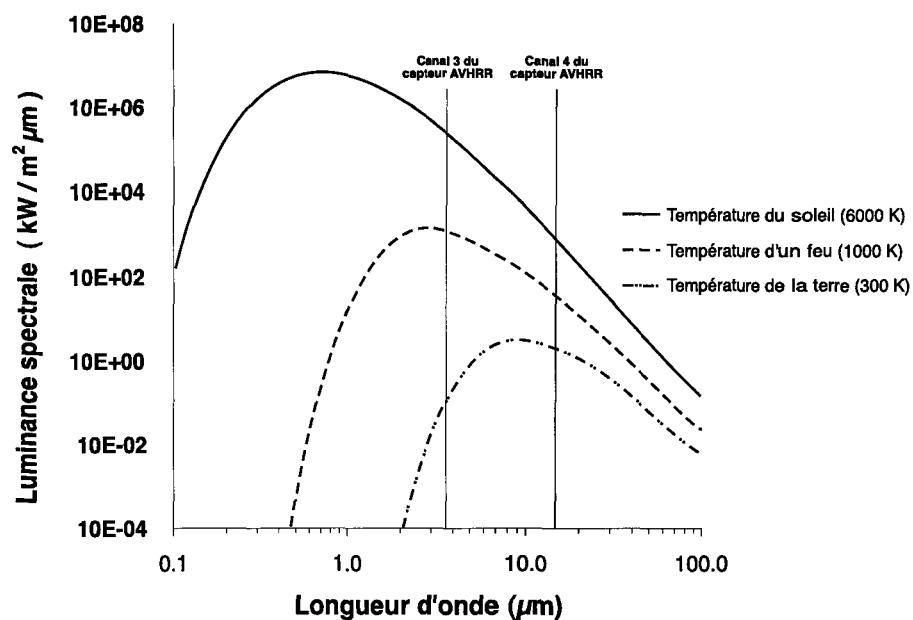


Figure 2.3 : Luminance spectrale d'un corps noir à différentes températures

La valeur maximale de luminance (Figure 2.3) du soleil, dont la température est aux environs de 6000 K, se retrouve au centre du spectre visible soit à des longueurs d'ondes de l'ordre de 0,5 µm. La valeur maximale de luminance d'un feu de forêt, dont la température est généralement autour de 800 K, se situe à des longueurs d'ondes entre 3,5 et 4,0 µm. Pour la terre dont la température est de l'ordre de 300 K, le maximum de luminance se trouve plutôt à des longueurs d'ondes voisinant 9,7 µm soit au centre des régions de l'infrarouge thermique. Comme l'indique le tableau 2.1, le canal 3 du capteur AVHRR capte des longueurs d'ondes se trouvant entre 3,550 et 3,930 µm. Par conséquent, pour les secteurs occupés par un feu dont la température avoisine 1000 K, la luminance reçue par le canal 3 sera beaucoup plus grande que la luminance reçue par le canal 4. Kennedy et al. (1994) mentionnent à ce sujet que la luminance reçue par le canal 3 augmente d'un facteur de 1 516 par rapport à celle reçue par le canal 4 pour un même pixel. C'est ce différentiel qui est à la base de la détection des feux à l'aide du capteur AVHRR (Kennedy et al. 1994). Le canal 3 du capteur AVHRR permet de détecter de petits, mais très chauds points d'intérêt météorologique (Flannigan et Vonder Haar 1986). Les feux de forêt (Matson et Holben. 1987), et les émissions industrielles (Matson et Stephens 1981) ont aussi été détectés en utilisant le canal à 3,7 µm.

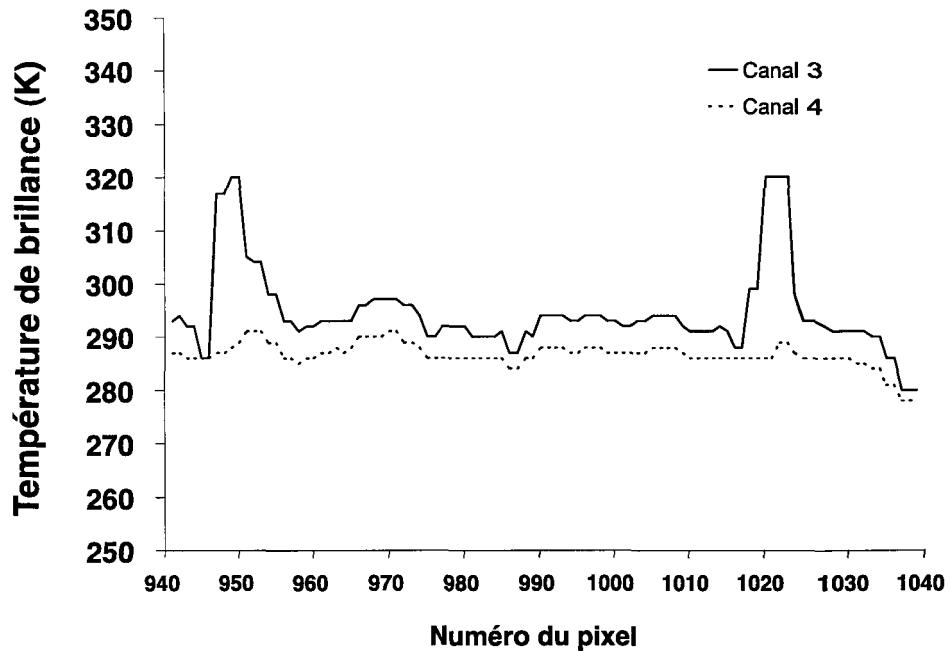


Figure 2.4 : Valeur radiométrique des pixels d'une section de la ligne 67 de l'image du 20 juin 1996.

La figure 2.4 est une représentation de la température de brillance d'une section de la ligne 67 des canaux 3 et 4 du satellite NOAA-14. On nomme température de brillance, la valeur radiométrique mesurée par le capteur AVHRR des satellites TIROS de la NOAA. Cette section de ligne a été extraite d'une image du 20 juin 1996. En ordonnée, on retrouve la température de brillance alors qu'en abscisse, on retrouve le numéro du pixel dans la ligne. On remarque que, du pixel 960 au pixel 1010, les températures de brillance sont semblables pour les deux canaux. Cependant, dans l'entourage immédiat du pixel 950, la température de brillance des pixels du canal 3 est beaucoup plus élevée que la température de brillance des pixels du canal 4. En appliquant les notions vues précédemment, il est permis d'affirmer que le pixel 950 de la ligne 67 de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 est

occupé en totalité ou en partie par une source chaude. Les statistiques des feux de forêt de 1996 confirment qu'il s'agit d'un feu de forêt.

2.4 Rehaussement des images

La technique qui a été utilisée dans cette étude est basée sur des travaux réalisés par Dozier en 1981. Le chercheur a démontré qu'il était possible, en utilisant une approche multispectrale, de détecter les sources de chaleur intense. En utilisant les canaux 3 et 4 du capteur AVHRR, Matson et Dozier (1981) ont utilisé cette méthode pour détecter des aciéries du mid-ouest américain et les flammes permanentes des champs d'extraction de pétrole dans la région du Moyen-Orient.

La détection des feux avec des données acquises par le capteur AVHRR repose habituellement sur deux approches. La première utilise un simple seuillage du canal 3 qui fait en sorte que les pixels dont la valeur radiométrique est près de la valeur de saturation du capteur sont déclarés comme pixels contenant un feu (Malingeau et al. 1985). La seconde approche utilise la différence de réponse relative des longueurs d'onde des canaux 3 et 4. Comme le précise la loi de Wein, cette différence est plus grande pour des cibles dont la température est élevée que pour des cibles dont la température est basse. Pour qu'un pixel soit identifié comme un pixel contenant un feu, sa valeur dans le canal 3 doit être plus grande que 316 K, sa valeur doit aussi être au minimum supérieur à celle du canal 4 plus 10

K et finalement, la valeur du pixel dans le canal 4 doit être supérieure à 250 K (Kaufman et al. 1989; Kaufman et al. 1990).

Une limitation du capteur AVHRR pour la détection et la caractérisation des feux est la température de saturation du canal 3, aux environs de 321 K. Un point chaud occupant une partie d'un pixel provoquera la saturation du capteur et donc du pixel si la luminance du point chaud (le feu) additionnée à celle de l'arrière-plan (la surface du pixel non affecté par le feu) excède le flux d'énergie causant la saturation du capteur. Kaufman et al. (1990) indiquent que les feux dont la température est supérieure à 500 K et qui occupent entre 0,01 et 0,1 % de la surface d'un pixel satureront le canal à 3,7 µm. Une étude de Kennedy et al. (1994) a cependant démontré que, pour une température ambiante de 300 K, un feu occupant 100 m² de la surface d'un pixel devrait avoir une température de 1 000 K pour saturer le canal 3.

En ce qui concerne la détection des feux à l'aide d'image satellitaire NOAA, un autre problème, rapporté par Langass (1992) puis Muirhead et Cracknell (1984) puis par Grégoire et al. (1993), pourrait être causé par la contribution de la radiation solaire aux longueurs d'ondes du canal 3. Pour ces deux études réalisées dans la partie ouest de l'Afrique, la réflexion de la radiation solaire dans le canal 3 était généralement associée à de grandes zones dénudées dont le sol était de couleur pâle. Matson et Dozier (1981) puis Flannigan et Vonder-Haar (1986), qui étudiaient des secteurs plus froids à des latitudes plus élevées, ont démontré que les erreurs causées par ce type de contamination étaient négligeables et non

significatives (Kennedy et al. 1994). Les caractéristiques climatiques du secteur retenu pour cette étude correspondent à celles qui ont utilisées par Flannigan et Vonder-Haar (1986). Ce qui permet d'affirmer que la contribution de la réflexion de la radiation solaire aux longueurs d'ondes du canal 3 n'est pas un réel problème dans le cadre de cette étude.

2.5 Analyse des données satellitaires

2.5.1 Extraction et préparation des images pour le traitement

L'analyse des images a été réalisée au laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi sur une station de travail de type SUN SparcStation 20. Le logiciel de traitement numérique d'image Easi/Pace de la compagnie PCI a été utilisé pour le traitement des images.

L'archive d'image satellitaire NOAA mise sur pied par le laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi a permis de réaliser la première étape du traitement qui a été de faire une sélection des images présentant les caractéristiques nécessaires pour l'identification des feux. Pour réaliser cette étape, les aperçus (Figure 2.5) des images de l'été 1997 ont été utilisés. Ces aperçus sont des compositions en fausses couleurs des différents canaux du satellite NOAA-14 créées par la STAR/IMSAT au moment de l'archivage de l'image. Ces aperçus constituaient un outil de choix pour la sélection

préliminaire des images. Les critères retenus pour la sélection des images étaient que l'image couvre le territoire à l'étude et que le centre de l'image corresponde assez bien au centre de la région étudiée. Ce dernier critère a éliminé les images pour lesquelles le territoire étudié occupait la périphérie de l'image ce qui aurait pu affecter les résultats obtenus puisque la géométrie des pixels varie du centre vers les bords de l'image. Au centre, les pixels sont uniformes, presque carrés alors que les pixels en périphérie sont plutôt rectangulaires et deviennent de plus en plus trapézoïdaux à mesure que l'on s'approche du bord de l'image. De façon générale, les images dont l'angle d'exposition était de plus de 40° n'ont pas été retenues pour cette étude pour minimiser le risque de fausses alarmes (Rauste 1996). Un troisième critère retenu a été celui du dégagement maximum de nuage. L'objectif de l'étude étant de développer une méthode d'identification des feux de forêt en comparant les observations satellitaires aux observations du terrain, il fallait éliminer d'emblée les images qui n'auraient pas permis de localiser les feux. Près de 35 images ont ainsi été sélectionnées pour les mois de juin, juillet et août 1997.

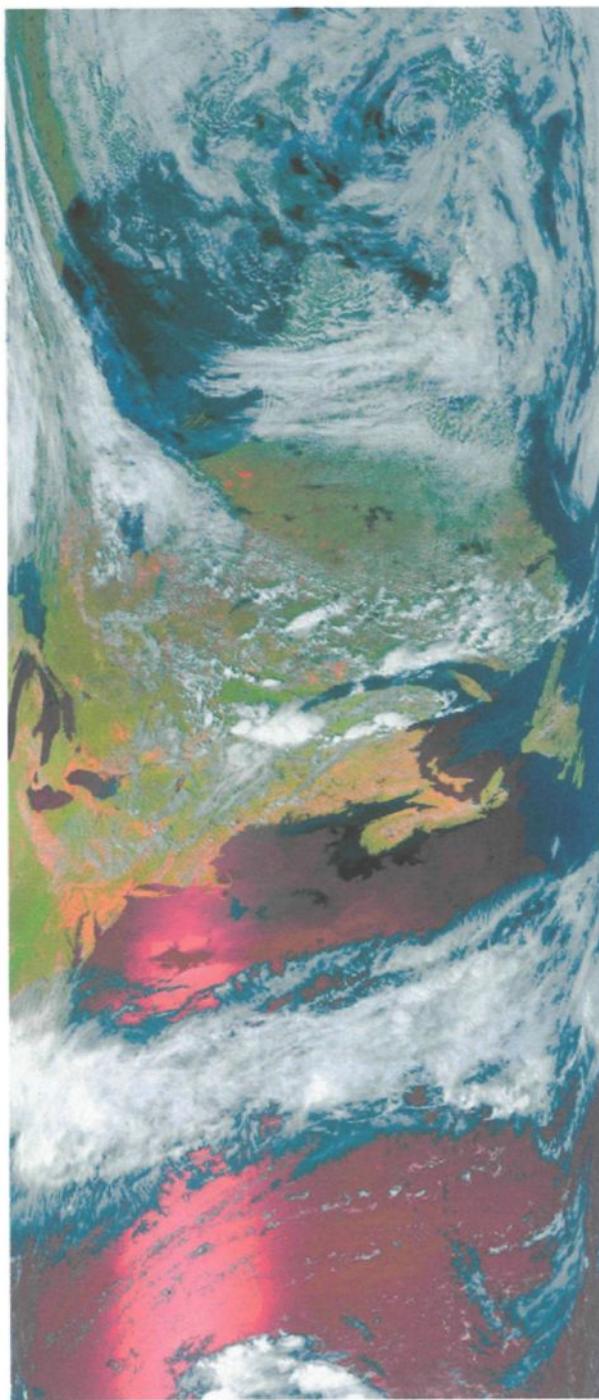


Figure 2.5 : Aperçu de l'image NOAA-14 du 31 juillet 1997.

La deuxième étape du traitement a été d'extraire des rubans magnétiques chacune des images retenues pour l'étude en format *Quorum*. Ce format de fichier correspond à celui dans lequel le satellite transmet les images aux stations terrestres de réception. Par la suite, il a été nécessaire de rectifier le nom des images indiqué dans l'entête des fichiers reçus du satellite afin de corriger un problème ayant affecté la chaîne de réception STAR/IMSAT au cours d'une partie de l'année 1997. Cette étape simple était absolument nécessaire pour les étapes subséquentes du traitement. Une autre étape du traitement fut de valider le temps de chacune des lignes constituant l'image et de resynchroniser les lignes dont le temps était incorrect. Il arrive que le temps associé à chacune des lignes de l'image soit incorrect dû à des problèmes lors de la transmission des images. Une fois cette étape de correction réalisée, le calcul de la dérive du temps transmis par le satellite était appliqué pour rendre possible la localisation géographique de l'image dans une étape ultérieure. Pour permettre le traitement subséquent des images avec les outils disponibles, l'image devait être transformée du format *Quorum* au format NOAA 1b. Ce format est un standard qui est généralement reconnu et utilisé par la plupart des logiciels de traitement d'image satellitaire. Le format d'image NOAA 1b a aussi l'avantage de contenir toutes les informations et paramètres nécessaires pour calibrer et corriger les images satellitaires. Les étapes du traitement des images mentionnées plus haut ont été réalisées avec des applications développées au laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi.

La dernière étape de la préparation des images a été d'importer ces dernières dans le format du logiciel de traitement d'image. Les images ont donc été transformées du format

NOAA-1b vers le format PCIDSK. Ce format contient lui aussi les informations nécessaires à la calibration et à la correction des images. Bien qu’absolument nécessaires, ces étapes de préparation des images n’étaient en fait que préliminaires. La section suivante présentera les différentes étapes du traitement permettant la détection des feux de forêt.

2.5.2 Traitement des images pour l’identification des feux

La première étape du traitement concerne la calibration radiométrique des images (Illera et al. 1995). La calibration radiométrique permet de relier les données transmises par le capteur à une mesure physique réelle. La calibration transforme les données provenant des canaux thermiques (canaux 3, 4 et 5) en température de brillance et les données du canal visible (canal 1) et du canal infrarouge (canal 2) sont transformées en valeurs de réflectance. La calibration des images satellitaires peut être schématisée en trois grandes étapes. Une première étape concerne la linéarisation des données puisque le capteur du satellite reçoit l’intensité du rayonnement quantifiée dans un domaine fixe de 1 024 états. Pour obtenir la luminance spectrale réelle reçue par le satellite, il faut aussi tenir compte de la réponse des instruments du détecteur dans la compensation des valeurs radiométriques des pixels. Ceci constitue en fait la deuxième étape de la calibration radiométrique. La dernière étape de la calibration radiométrique permet de corriger les effets de l’élévation solaire sur le canal visible et pour les canaux thermiques, de compenser la diminution de la luminance spectrale suite au passage du rayonnement à travers l’atmosphère. La calibration radiométrique,

effectuée à l'aide du module AVHRRAD du logiciel PCI, est réalisée à partir des coefficients de conversion et des paramètres orbitaux transmis par le satellite en même temps que l'image. Ce module a lui-même été développé en utilisant les travaux de Liping et Rundquist (1994). Les effets atmosphériques n'ont pas été pris en compte lors de la calibration radiométrique des images. Ceci s'explique par le fait que les bandes utilisées pour la détection des feux étaient toutes deux dans le spectre thermique et que les mesures de luminance des deux bandes ont été réalisées simultanément par le capteur AVHRR. Il est donc permis de croire que les effets atmosphériques ont influencées de façon similaire les bandes 3 et 4. Puisque la détection repose sur la comparaison de ces bandes entre elles, il est permis de croire que les effets atmosphériques auront eu un impact limité sur l'efficacité de la méthode. Pour faciliter les traitements ultérieurs, un nouveau canal était ajouté à l'image immédiatement après la calibration radiométrique. Tel que mentionné plus haut, le fait que les canaux 3 et 4 n'aient pas la même réponse pour un même point chaud observé au sol rend possible la détection des feux. La figure 2.3 montre que, pour une même température au sol, la brillance d'un corps noir est beaucoup plus élevée dans le domaine de longueur d'onde du canal 3 que dans le domaine de la longueur d'onde du canal 4. Cette différence est minime pour de basses températures mais devient de plus en plus grande à mesure que la température de la cible augmente. Cependant, le fait que les bandes aient été calibrées radiométriquement devrait à première vue faire disparaître cette différence entre la bande 3 et la bande 4.

Pour démontrer qu'il subsiste tout de même une différence entre les canaux 3 et 4 après la calibration radiométrique, posons x comme étant la luminance d'un pixel p d'un canal c d'une image satellitaire. Ce pixel peut contenir une source chaude, dans ce cas, un feu de forêt occupant une proportion β du pixel (où $0 \leq \beta \leq 1$) et ayant une luminance x_1 . La superficie restante du pixel $(1-\beta)$ étant quant à elle occupée par la forêt et ayant une luminance x_2 (Dozier 1981). Pour ce pixel, il est permis d'écrire :

$$x_{p,c} = \beta x_1 + (1 - \beta)x_2 \quad (1)$$

Une approximation de la température t en fonction de la luminance peut être obtenue en utilisant une équation quadratique (Liping et Rundquist 1994). De façon générale, il est donc permis d'écrire :

$$t_{p,c} = k + ax_{p,c} + bx_{p,c}^2 \quad (2)$$

où :

$t_{p,c}$: température du pixel p du canal c
 $x_{p,c}$: luminance du pixel p du canal c
et k, a, b sont des constantes

En substituant l'expression de la température d'un pixel (1) dans l'équation de la température obtenue à partir de la luminance (2), on obtient :

$$\begin{aligned}
 t &= k + a \cdot [\beta x_1 + (1-\beta)x_2] + b \cdot [\beta x_1 + (1-\beta)x_2]^2 \\
 t &= \beta \cdot t_1 + (1-\beta) \cdot t_2 - b\beta(1-\beta)(x_1 - x_2)^2 \\
 t &= \beta \cdot t_1 + (1-\beta) \cdot t_2 - b\beta(1-\beta)(x_1 - x_2)^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

Les deux premiers termes de l'équation (3) montrent que la température équivalente d'un pixel mixte feu-forêt est dépendante des deux températures respectives, et de la proportion du pixel occupé par le feu contenu dans ce pixel. La température du pixel est aussi dépendante de la température et de la superficie du pixel qui n'est pas occupé par le feu. Le dernier terme de l'équation (3) montre quant à lui que la température du pixel dépend de la proportion du pixel occupé par le feu par rapport à la superficie totale du pixel. Le troisième terme permet aussi de conclure que la luminance des 2 sources (feu et forêt) influence la température du pixel. Cependant, l'équation (3) montre principalement que le carré de la différence de luminance entre les 2 sources ($x_1 - x_2$) détermine la température du pixel. Plus la différence de luminance est grande, plus le troisième terme de l'équation (3) sera déterminant lors du calcul de la température du pixel.

En soustrayant la valeur de chacun des pixels du canal 3 à la valeur des pixels correspondants du canal 4, il est possible donc de différencier les points chauds de l'environnement. La valeur résultante de la soustraction des valeurs radiométriques d'un même pixel pour les bandes 3 et 4 est plus grande pour un pixel occupé par une source chaude, un feu, que pour les autres pixels se trouvant à proximité mais ne contenant pas de feux. Le résultat de la soustraction des bandes était placé dans la bande vide qui avait été

crée dans une étape précédente. Pour l'identification des feux, une valeur supérieure à 20 K a été retenue. Ce seuil a été désigné à partir de l'observation de plusieurs feux de l'image ayant été utilisée pour le développement de la méthode et à partir de la littérature consultée (Kennedy et al. 1994).

Plusieurs effets géométriques affectent les images obtenues par la télédétection. Il est généralement impossible de superposer les images brutes à une représentation graphique du territoire. Cette caractéristique des images satellitaires oblige à effectuer certaines transformations géométriques des images. Pour faciliter la vérification de la méthode et en évaluer le potentiel, la dernière étape du traitement des images a donc consisté à faire des corrections géographiques. La projection conique de Lambert adaptée pour la province de Québec a été retenue. Cette correction a été réalisée à l'aide du module AVHRRCOR du logiciel PCI. Le module AVHRCOR utilise les informations orbitales et temporelles qui ont été transmises par le satellite en même temps que l'image. Le module AVHRCOR transforme les images par des modèles mathématiques fondés sur la connaissance précise des paramètres liés à la prise des données, soit l'ensemble de la fonction de transfert entre la position d'une cible au sol et la position de l'image de cette cible dans le système de référence de l'image. Comme il a été mentionné précédemment, certaines informations, essentiellement au niveau du temps, ont dû être corrigées. En effet, pour permettre cette étape spécifique du traitement des images, il a été nécessaire de corriger l'heure des lignes de l'image suite à une dérive de l'horloge du satellite.

Pour minimiser les risques d'erreur pendant le traitement de chaque image retenue pour l'étude, l'ensemble des manipulations a été automatisé au sein d'une macrocommande. En indiquant les numéros d'archive des images à traiter (ruban et position) le système informatisé prenait en charge chacune des étapes du traitement, de l'extraction de l'archive et de géocorrection de l'image.

Le produit final de ce traitement était des images comprenant six canaux représentés dans une projection conique de Lambert. Les canaux constituant ces images étaient répartis de la façon suivante : les cinq canaux originaux calibrés radiométriquement et un canal constitué de la soustraction des bandes 3 et 4. Pour vérifier la capacité et l'efficacité de ce traitement à détecter des feux de forêt, les images-résultats ont été comparées avec les cartes de localisation des feux de forêt tracées à partir des données fournies par la direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles du Québec. Les résultats de cette comparaison et certaines autres observations sont présentés au prochain chapitre.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre se divise en 2 parties distinctes. La première présente les canaux 3, 4 et le canal-résultat d'une image traitée pour l'identification des feux de forêt. La deuxième partie présente la comparaison entre les images-résultats et les données de la direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles du Québec.

3.1 Images-résultats du traitement pour l'identification des feux de forêt

Avant de passer à l'évaluation de l'efficacité de la méthode par comparaison avec les données sur les feux fournis par le ministère des Ressources naturelles du Québec, il faut d'abord s'attarder quelques instants aux images obtenues suite aux traitements. La figure 3.1 présente une sous-scène d'une composition multi-bandes du capteur AVHRR du satellite NOAA-14 pour le 20 juin 1996 à 18h00 GMT. Le rehaussement a été développé par le laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi. Le secteur correspond à la zone d'étude. Ce rehaussement permet de voir des feux de forêt à l'ouest du lac

Mistassini. Le rehaussement permet aussi de voir les panaches de fumée se dégageant des feux de forêt en action.

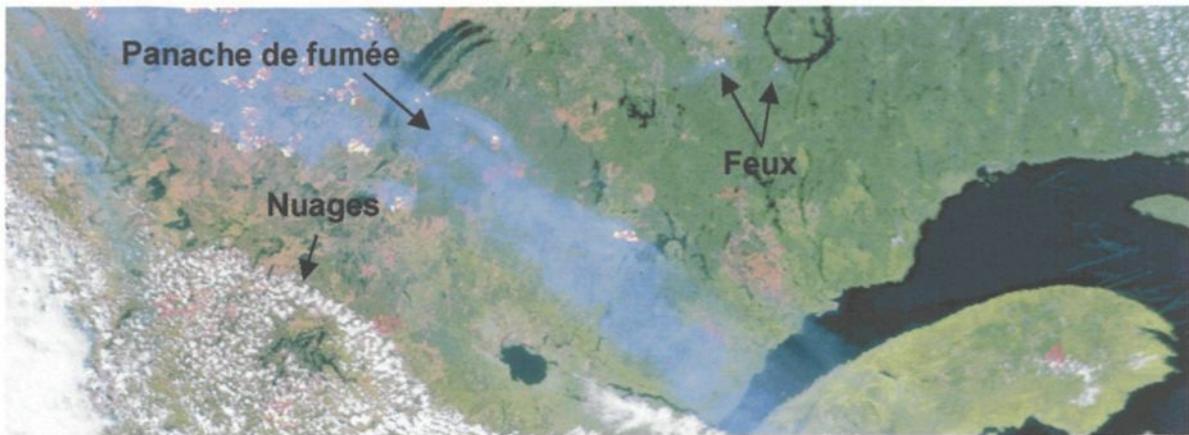


Figure 3.1 : Sous-scène de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT

La figure 3.2 quant à elle présente les bandes 3 et 4 du capteur AVHRR pour cette même image du 20 juin 1996. La bande 3 peut être intéressante puisqu'elle permet de voir certains feux, mais elle est trompeuse puisque certaines zones plus blanches que d'autres pourraient laisser croire qu'un feu y est présent alors que ce n'est pas le cas. Le canal 4 est moins intéressant pour la détection des feux de forêt parce qu'il offre beaucoup de confusion entre les feux et la forêt.

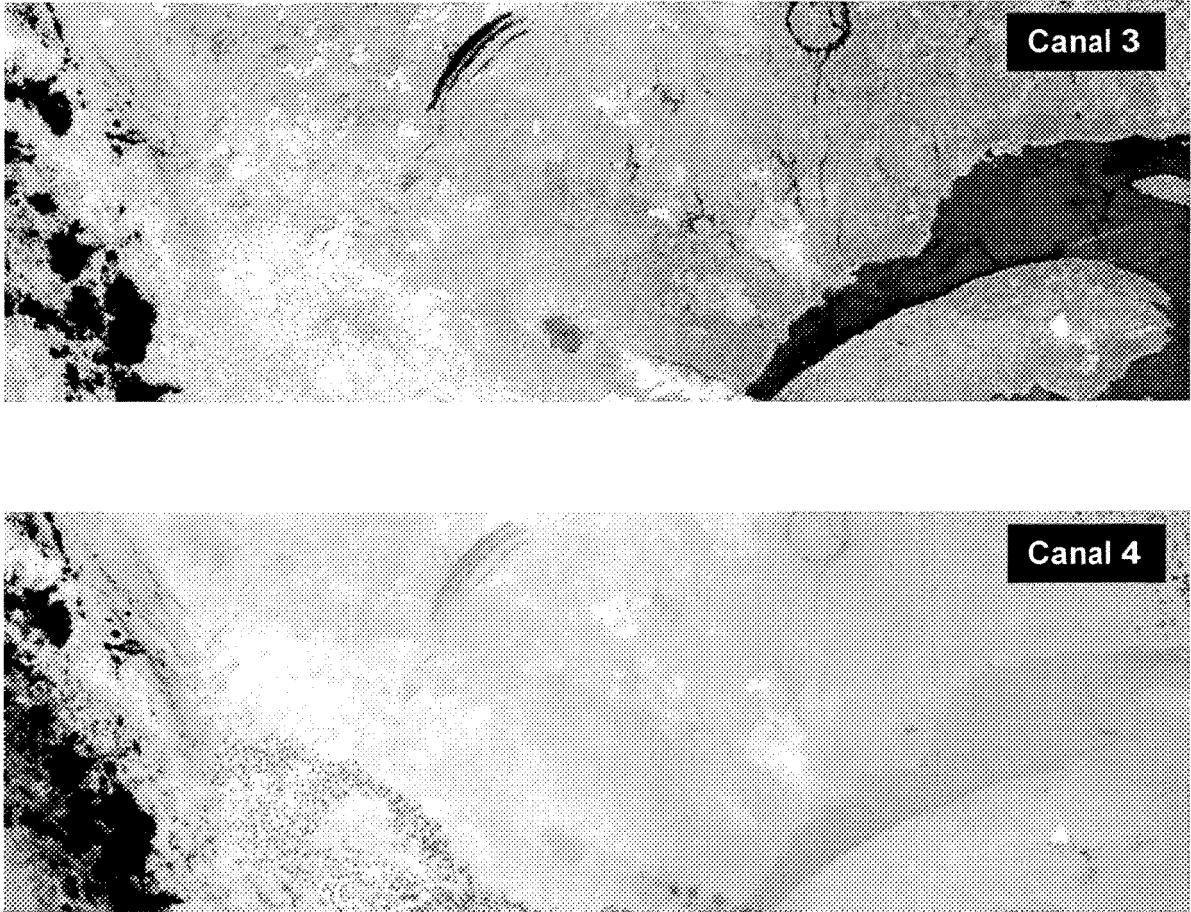


Figure 3.2 : Canaux 3 et 4 couvrant la zone d'étude pour l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT

La figure 3.3 montre quant à elle la bande contenant le résultat du traitement de l'image NOAA du 20 juin 1996 avec la méthode d'identification des feux présentée dans le chapitre précédent. Le rehaussement utilisé fait en sorte que les feux apparaissent en blanc et que les secteurs forestiers apparaissent en gris foncé ou en noir. Les nuages apparaissent eux aussi en blanc, il est donc important d'éviter de les confondre avec les feux. Les nuages occupent le sud-ouest de l'image présentée à la figure 3.3. La texture des nuages fournit

cependant un critère de différenciation intéressant pour permettre de discriminer les nuages par rapport aux feux de forêt. On constate que les feux au sud du réservoir Manicouagan apparaissent clairement avec une certaine intensité, les zones blanches étant les plus chaudes et les plus actives. Ainsi, la méthode d'identification des feux élimine en partie la fumée. Cette caractéristique est intéressante puisqu'elle permet d'identifier certains feux qui auraient pu être voilés par la fumée.

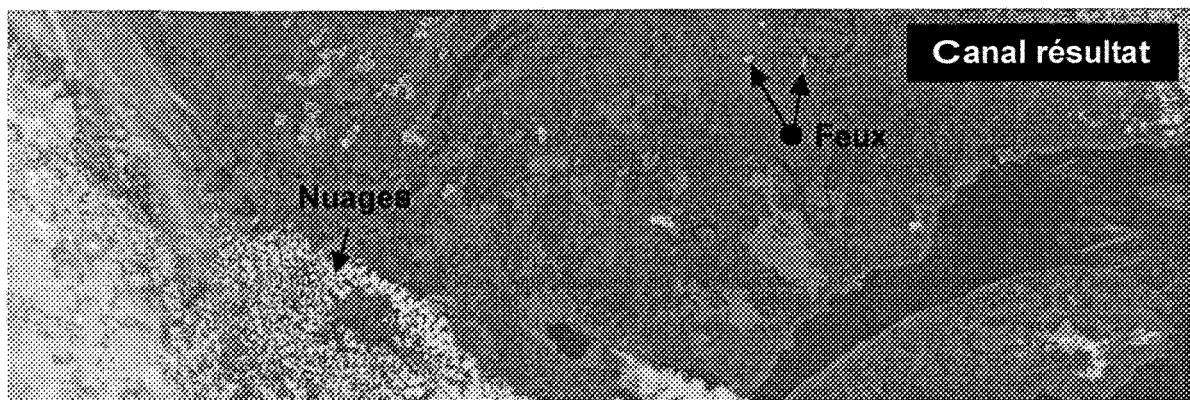


Figure 3.3 : Image-résultat du traitement pour l'identification des feux de forêt de la zone d'étude de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT.

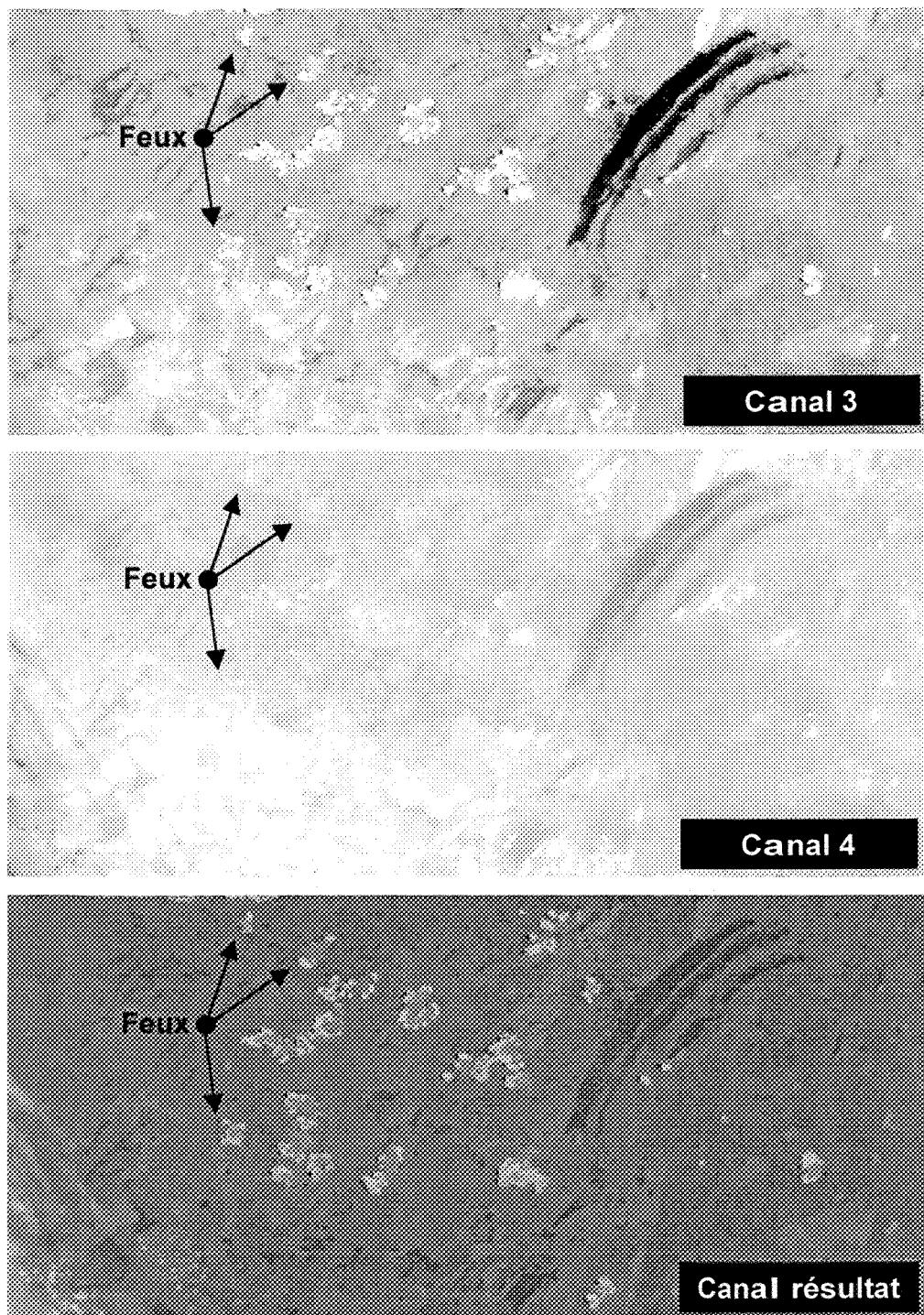


Figure 3.4 : Canaux 3, 4 et résultat de la partie nord-ouest de la zone d'étude de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996 à 18h00 GMT.

La figure 3.4 présente quant à elle les canaux 3, 4 et le résultat du traitement de la partie nord-ouest de l'image NOAA-14 du 20 juin 1996. Cette figure permet encore une fois de constater que le traitement de l'image avec le rehaussement développé dans cette étude permet de faire ressortir les feux par rapport à la forêt environnante. L'image obtenue permet de plus de constater certaines nuances à l'intérieur des secteurs brûlés.

3.2 Comparaison des images-résultats avec les données de la direction de la conservation des forêts

Pour évaluer l'efficacité de la méthode à identifier les feux de forêt, 3 classes de feu ont été déterminées. Une première regroupant les feux de moins de 0,1 hectare, une deuxième regroupant les feux dont la taille se situe entre 0,1 et dix hectares et une dernière classe regroupant les feux de plus de dix hectares. Ce classement a été transmis par la direction de la conservation de la forêt du ministère des Ressources naturelles du Québec. Le tableau 3.1 montre le nombre de feux pour chacune des classes dans la zone d'étude et pour les jours des images retenues.

Tableau 3.1 : Nombre de feux de forêt dans la zone d'étude

Classe	Nombre
A (< 0,1 ha)	67
B (0,1 – 10 ha)	103
C (> 10 ha)	46
Total	216

Pour la zone étudiée, 216 feux de forêt ont été dénombrés pour les images retenues pour cette étude. Même si un tri préliminaire avait été fait lors du choix des images pour limiter le nombre de feux voilés par des nuages dont l'identification et la détection allaient de toute façon être impossibles, les nuages ont quand même voilé certains feux. Le tableau 3.2 présente donc le nombre de feux visibles par rapport au nombre total de feux. Un feu était qualifié visible lorsqu'il n'était pas couvert par des nuages. Le tableau 3.3 montre quant à lui le nombre de feux qui ont été identifiés par rapport au nombre total de feux. Finalement, le tableau 3.4 montre le nombre de feux qui ont détectés à l'aide des images satellitaires par rapport au nombre de feux qui n'étaient pas couverts par les nuages et donc visibles par le satellite.

Tableau 3.2 : Nombre de feux non couverts par les nuages par rapport au nombre total de feux

Classe	Nombre / Nombre total (%)
A (< 0,1 ha)	16 / 67 (24%)
B (0,1 – 10 ha)	27 / 103 (26%)
C (> 10 ha)	16 / 46 (35%)
Total	59 / 215 (27%)

Tableau 3.3 : Nombre de feux identifiés à l'aide des images satellitaires et de la méthode de traitement par rapport au nombre total de feux

Classe	Nombre / Nombre total (%)
A (< 0,1 ha)	0 / 67 (0%)
B (0,1 – 10 ha)	0 / 103 (0%)
C (> 10 ha)	10 / 46 (22%)
Total	10 / 215 (4%)

Tableau 3.4 : Nombre de feux identifiés à l'aide des images satellitaires et de la méthode de traitement par rapport au nombre de feux qui étaient visibles.

Classe	Nombre / Nombre total (%)
A (< 0,1 ha)	0 / 16 (0%)
B (0,1 – 10 ha)	0 / 27 (0%)
C (> 10 ha)	10 / 16 (62%)
Total	10 / 59 (16%)

Les résultats montrent donc que 16% (10/59) des feux visibles ont été identifiés pour les différentes classes de taille. La méthode n'a pas permis d'identifier de feux dont la taille était inférieure à dix hectares. Cependant, la méthode développée a permis d'identifier plus

de 60 % des feux de plus de dix hectares. La classe de taille pour laquelle le maximum de feux a été identifié est celle de plus de dix hectares. Cette observation est compréhensible puisque les plus grands feux sont les plus chauds et donc les plus facilement détectables par le satellite.

Un autre objectif de l'étude était de déterminer quelle est la taille du plus petit feu de forêt détectable par le satellite. Le plus petit feu de forêt identifié à l'aide de la méthode de traitement développé au cours de cette étude a été de 20 hectares. Ce résultat a lui aussi été obtenu par la comparaison des images-résultats aux données transmises par la direction de la conservation des forêts.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Le premier objectif de cette étude était de développer une méthode automatisée de traitement d'images satellitaires NOAA pour la détection des feux de forêt. En utilisant les travaux de Dozier (1981), et de Kennedy et al. (1994), il a été possible de mettre sur pied une procédure automatisée de traitement d'image satellitaire pour la détection des feux de forêt. La procédure prend en charge une image satellitaire et réalise les étapes de traitement présentées dans le deuxième chapitre de cet ouvrage. La méthode développée dans cette étude compare la luminance mesurée par les canaux 3 et 4 du capteur AVHRR au-dessus des feux de forêt.

Le deuxième objectif de l'étude était de déterminer l'efficacité de la méthode développée en comparant ses résultats à ceux obtenus pour feux de forêt de la saison 1997 par la Direction de la conservation de la forêt du ministère des Ressources naturelles du Québec. Les images présentées à la section 3.1 montrent que le traitement des images en utilisant la méthode de détection des feux permet de mettre en évidence plusieurs feux présents à l'intérieur de la zone étudiée. Bien que les canaux 3 et 4 fournissent des

informations intéressantes sur la répartition des feux, le traitement des images met mieux en évidence les feux par rapport au reste de l'image (Figure 3.3). Les feux contrastent de façon importante avec les forêts avoisinantes. En plus de la détection des feux, la méthode permet aussi d'évaluer leur intensité et leur direction. La figure 3.4 montre un agrandissement d'un secteur de la zone d'étude sur lequel il est possible de très bien voir la direction empruntée par le feu, et aussi de pointer les secteurs où le feu est le plus chaud, et par le fait même le plus intense.

La deuxième section du chapitre 3 fournit les résultats obtenus à la suite de la comparaison entre les images-résultats et les données sur les feux fournies par la Direction de la conservation des forêts. Le tableau 3.2 montre le nombre de feux non couverts par les nuages par rapport au nombre total de feux pour chacune des classes de feu. Ce tableau permet de constater que les nuages couvrent plusieurs feux constituant ainsi un problème important. En effet, seulement 59 feux sur un total de 215, soit 27%, n'étaient pas couverts par les nuages au moment du passage du satellite. Ce nombre est d'autant petit qu'un tri a été fait au moment de la sélection des images pour ne conserver que celles présentant un ennuagement minimal. Le tableau 3.3 présente quant à lui le nombre de feux détectés avec la méthode de traitement par rapport au nombre total de feux. La méthode n'a pas permis de détecter des feux de moins de dix hectares alors que 22% des feux de plus de dix hectares ont pu être détectés. Le tableau 3.4 présente le nombre total de feux détectés avec les images traitées avec la méthode par rapport au nombre de feux non couverts par les nuages. Aucun feu de moins de dix hectares n'a été détecté alors que 62% des feux de plus de dix hectares

ont pu être détectés. Cette dernière observation est facilement explicable par le fait que les grands feux occupent une proportion plus importante du pixel et qu'ils influencent d'autant plus la luminance mesurée par le capteur AVHRR. Bien que légèrement inférieure, l'efficacité de la méthode développée pour détecter les feux de forêt est comparable à celle obtenue par Flannigan et Vonder Haar en 1986. Cependant, ils ont utilisé une séquence d'images et un même feu pouvait être détecté sur plusieurs jours ce qui pouvait augmenter l'efficacité apparente de leur méthode puisque le nombre de feux détectés augmente, bien que le nombre total de feux reste le même.

Le dernier objectif de cette étude était de déterminer la surface minimale d'un feu pour qu'il soit détectable par le capteur AVHRR. En analysant la trentaine d'images retenues pour cette étude, le plus petit feu qu'il a été possible de détecter avait une superficie de 20 hectares selon des données du ministère des Ressources naturelles du Québec. Ce résultat se compare lui aussi à ceux obtenus par des études antérieures dont celles de Dozier (1981) et de Kennedy et al.(1994). Cependant, une étude de Zherebtsov et al. (1996) mentionne qu'il est possible de détecter des feux dont la superficie est de 0,01 hectare.

Bien que la méthode développée dans le cadre de cette étude soit efficace pour détecter les feux de forêt, il reste plusieurs cas où les images satellitaires n'ont pas permis de détecter les feux. Il y a plusieurs explications à ce constat. Premièrement, il est bon de rappeler l'instantanéité des images satellitaires. Le satellite mesure en continu la luminance du territoire qu'il survole et il faut 1 / 6 seconde au satellite pour mesurer la luminance des 2

048 pixels d'une ligne de balayage. Il faut donc $1 / (6 \times 2\,048)$ seconde pour mesurer la luminance d'un pixel. Il est donc possible que le feu, au moment du passage du satellite, soit voilé par la fumée ou qu'il couve momentanément. Pour expliquer que certains feux n'aient pas été détectés, il faut aussi connaître la nature des données sur les feux de forêt. Les superficies de feu sont celles du feu lorsqu'il a été éteint, et donc sa superficie maximum. Or au moment du passage du satellite, le feu n'atteint qu'une proportion de sa taille maximale ce qui rend sa détection encore plus difficile sinon impossible étant donné la résolution spatiale du capteur.

Il est aussi important de clarifier ce à quoi fait référence un feu détecté par le capteur AVHRR. On présume en effet qu'un pixel de feu ne contient qu'un seul feu alors que le pixel de 1 km par 1 km peut en fait contenir plusieurs petits feux dont la taille est inférieure à la résolution spatiale du capteur et qui ne sont donc pas détectables comme des événements individuels (Kennedy et al.1994).

Aussi il est possible que le seuil d'identification des feux utilisé pour cette étude ait fait en sorte que certains feux ne soient pas détectés. Si la différence de température entre le canal 3 et le canal 4 se situe sous le seuil critique, le feu ne sera pas détecté (Flannigan et Vonder Haar, 1986).

Malgré le fait que la méthode de détection des feux de forêt à l'aide d'images satellitaires ne permette pas de détecter tous les feux présents sur un territoire, elle peut

cependant fournir une information des plus précieuses aux responsables de la protection des forêts contre le feu (Kaufman et al. 1991). En effet, les images satellitaires couvrent de très grands territoires. Et, dans le cas des images provenant des satellites NOAA, la répétitivité des images fait en sorte qu'il est possible de suivre des phénomènes aussi dynamiques que les feux de forêt. Leur faible coût les rend d'autant plus intéressantes pour les responsables de la lutte contre les feux de forêt. Aucun autre moyen présentement disponible ne permet d'avoir un portrait de chaque kilomètre carré du territoire plusieurs fois par jour à un coût comparable à celui des images satellitaires.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

La méthode de détection des feux de forêt à partir de l'imagerie satellitaire NOAA présentée dans cette étude permet de faire le suivi de la situation des feux de forêt sur de très grands territoires. Entre autres, la détection des feux à l'aide d'images satellites permet de superviser les zones de protection restreinte. Les feux dans ces secteurs ne sont habituellement pas suivis et lorsqu'ils le sont, c'est qu'ils menacent des infrastructures ou des vies humaines. De plus, la détection des feux peut aussi être utile pour la zone de protection intensive puisqu'elle constitue une nouvelle source d'information pour les agences de protection des forêts contre le feu.

Plusieurs images satellites sont disponibles quotidiennement ce qui rend aussi possible le suivi de l'évolution des feux. La méthode de détection des feux permet aussi de déterminer l'intensité des différentes parties des feux et la direction dans laquelle ils se déplacent.

Étant donné que les objectifs fixés au début de ce projet de recherche ont tous été atteints, l'**expérience** peut être qualifiée de réussie.

RÉFÉRENCES

- Belward, A.S., Kennedy, P.J., et Grégoire, J.-M. (1994) The limitations and potential of AVHRR GAC data for continental scale fires studies. *International journal of remote sensing*, 15:2215-2234.
- Chuvieco, E. et Martin, M.P. (1994) a Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 60:563-570.
- Chuvieco, E. et Martin, M.P. (1994) b A simple method for fire mapping using AVHRR channel 3 data. *International journal of remote sensing*, 15:3141-3146.
- Dozier, J. (1981) A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixels resolution. *Remote sensing of environment*, 11:221-229.
- Flannigan, M.D. et Vonder Haar, T.H. (1986) Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian journal of forest research*, 16:975-982
- French, N.H.F., Kasischke, E.S., Bourgeau-Chavez, L.L., et Berry, D. (1995) Mapping the location of wildfires in Alaskan boreal forests using AVHRR Imagery. *International journal of wildland fire*, 5:55-61.
- Grégoire, J-M, Belward, A.S. et P.J. Kennedy (1993) Dynamique de saturation du signal dans la bande 3 du senseur AVHRR : handicap majeur ou source d'information pour la surveillance de l'environnement en milieu soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest ? *International journal of remote sensing*. 14 :2079-2095
- Holman J.P. (1986) *Heat transfert*. McGraw-Hill Book Compagny, New York.
- Kaufman, Y.J., Setzer, A., Justice, C., Tucker, C.J., Pereira, M.C., et Fung, I. (1991) Remote sensing of biomass burning in the tropics. Fine in the tropical biota: ecosystem processes and global. 84:371-397
- Kennedy, P.J., Belward, A.S., et Grégoire, J.-M. (1994) An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data. *International journal of remote sensing*, 15:2235-2255.
- Kidwell, K.B. (1998) NOAA polar orbiter data users guide (Tiros-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 and NOAA-14) National environmental satellite data and information service. Washington D.C.

- Langass, S. (1992) Temporal and spatial distribution of savanna fires in Senegal and the Gambia, west Africa, 1989-90 derived from multi-temporal AVHRR night images. *International journal of wild fire*. 2 :21-36
- Liping, D. et Rundquist, D.C. (1994) A one step algorithm for correction and calibration of AVHRR level 1b data. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 60:165-171.
- Malingreau, J.-P., Stephens, G., et Fellows, L. (1985) Remote sensing of forest fires: Kalimanta and north Borneo in 1982-1983. *Ambio: a journal of the human environment research and management*, 14:314-321.
- Matson, M. et Dozier, J. (1981) Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 47 :1311-1322.
- Matson, M. et Holben, B. (1987) Satellite detection of tropical burning in Brazil. *International journal of remote sensing*, 8:509-516.
- Matson, M. et Stephens, G. (1987) Fire detection using data from the NOAA-N satellites. *International journal of remote sensing*, 8:961 -970.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. (1997) Ressource et industrie forestières-Portrait statistique Édition 1997. Gouvernement du Québec.
- Muirhead, K et Cracknell, A.P. (1984) Identification of gas flares in the North Sea using satellite data. *International journal of remote sensing*. 6 :827-833
- Rauste, Y. (1996). Forest fire detection with satellites for fire control. Kraus, K. et Waldhäusl, P. *International society for photogrammetry and remote sensing*. 31:584-588.
- Société de protection des forêts contre le feu.(1998) www.sopfeu.qc.ca
- Zherebtsov, G., Kokourov, V.D., Koshelev, V.V., et Min'ko, N.P. (1996) Use of NOAA AVHRR data to detect forest fires. *Earth observation and remote sensing*, 13:783-787.