

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

PAR
ANDRÉ CARRIER, B.Sc.Géographie

CONTRIBUTION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE NOAA À LA CARTOGRAPHIE
DES GRANDS FEUX DE FORÊT DU QUÉBEC BORÉAL
1972 À 1994

AOÛT 1996



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

La cartographie des grands feux de forêt de la zone boréale du Québec peut se faire à l'aide d'outils traditionnels ou encore avec de nouveaux outils tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Dans le cadre de cette recherche, l'imagerie satellitaire est utilisée pour cartographier les feux de grande envergure, soit de 15 000 hectares et plus. Précisément, l'image satellitaire NOAA du 4 septembre 1994, couvrant toute la zone d'étude c'est-à-dire la forêt boréale québécoise, nous permet de localiser d'un seul coup d'oeil ces grands feux pour les années 1972 à 1994, mais aussi plusieurs feux qui n'ont pas été cartographiés ou répertoriés par le ministère des Ressources naturelles, soit parce qu'ils sont situés dans des zones de protection restreinte ou pour d'autres raisons. Avec une image semblable, on obtient une vue globale intéressante qui permet de distinguer les incendies de forêt ainsi que les grands ensembles biophysiques du territoire à l'étude.

La répartition spatiale des grands feux (qui sont des feux de foudre à 94%, i.e. 51 sur 54 répertoriés depuis 1972) est inégale sur le territoire à l'étude. En effet, on remarque que certains secteurs sont plus affectés que d'autres. Entre autres, l'ouest et le nord-ouest du lac Mistassini (incluant une partie du territoire de la Baie-James) est très atteint par ce phénomène. Temporellement, la répartition des feux est aussi différente d'une année à l'autre. Les périodes les plus touchées sont les années 1976, 1983 et 1991 incluant de grandes superficies brûlées et souvent précédées ou suivies par peu ou pas de feux de grande taille. Certains facteurs géophysiques et climatiques tendent à expliquer ces phénomènes, tels qu'une répartition inégale des précipitations et des températures. Par exemple, les grands incendies de forêt débutent presque essentiellement dans les mois de mai, juin et juillet. Le type de dépôts de surface et le relief de certains secteurs présentent des conditions idéales pour l'occurrence de ces feux, sans oublier d'autres facteurs tout aussi importants tels que le type de combustible et la fréquence de la foudre. Ainsi, tous ces facteurs influencent dans une certaine mesure la localisation des grands feux et peuvent aider les spécialistes qui travaillent sur la prédiction des feux.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche le Dr. Gilles H. Lemieux qui a su me diriger tout au long de ce travail. Pour la partie technique de la recherche, je veux également dire merci aux assistants de recherche du Laboratoire de télédétection de l'UQAC qui ont su répondre aux nombreuses questions informatiques et cartographiques, d'abord M. Daniel Bégin et M. Raymond Bégin, M. Carl Brisson et M. Claude Chamberland. Des remerciements particuliers à Mme Diane Thibeault et Mme Manon Langlois du ministère des Ressources naturelles du Québec qui ont fourni une très bonne collaboration concernant la collecte d'informations et à M. Jacquelin Martel, technicien en cartographie. Aussi, d'autres personnes du même ministère ont apporté une aide technique très appréciée, soit Messieurs Pierre Laframboise, Alain Coulombe, André Grenon et André Robitaille. De plus, un grand merci s'adresse à la Société de Protection des Forêts contre le Feu (SOPFEU), particulièrement à M. Gérard Lacasse et M. François Lefèvre qui ont fourni de l'information pour la présente recherche. Enfin, tout ce travail n'aurait été possible sans la contribution financière du Consortium de Recherche sur la Forêt Boréale de l'Université du Québec à Chicoutimi.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
TABLES DES MATIERES.....	IV
LISTE DES CARTES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES GRAPHIQUES.....	IX
INTRODUCTION	
0.1 Problématique.....	1
0.2 Objectifs de la recherche.	2
CHAPITRE I: REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Rôle et conséquences des feux situés en forêt boréale.....	4
1.2 Avantages des images NOAA.....	5
1.4 Prédiction des feux de forêt.....	7
CHAPITRE II: MÉTHODOLOGIE.....	11
2.1 Localisation du territoire à l'étude.....	12
2.2 La cartographie numérique:	12
2.2.1 Sélection de l'image de base.....	14
2.2.2 Corrections géométriques.....	14
2.2.3 Choix des bandes spectrales.....	17

2.2.4	Rehaussement linéaire des bandes 1, 2 et 3.....	19
2.2.5	Indice de végétation " NDVI ".....	19
2.2.6	Indice de végétation " GEMI ".....	20
2.2.7	Classification supervisée.....	20
2.3	La cartographie traditionnelle.....	23
CHAPITRE III :	RÉSULTATS.....	24
3.1	Description du couvert forestier.....	25
3.2	Sous-ensembles écologiques.....	28
3.3	Cartographie des feux:	30
3.3.1	Surestimation de la superficie des feux.....	30
3.3.2	Feux de 1972 à 1994.....	31
3.3.3	Feux non répertoriés.....	36
3.3.4	Synthèse des feux répertoriés et non répertoriés...	37
3.4	Synthèse spatiale et temporelle des feux.....	39
3.5	Paramètres géophysiques:	48
3.5.1	Géologie.....	49
3.5.2	Dépôts meubles.....	51
3.5.3	Relief.....	54
3.6	Paramètres climatiques:	58
3.6.1	Températures moyennes annuelles.....	59
3.6.2	Températures maximales moyennes en juin.....	62
3.6.3	Moyennes des précipitations totales annuelles.....	64
3.6.4	Moyennes des précipitations totales en juin.....	64
3.6.5	Moyennes des précipitations nivales annuelles.....	66
3.6.6	Années les plus chaudes et les plus froides.....	69
3.6.7	Années les plus humides et les plus sèches.....	71
3.6.8	Fréquence de la foudre.....	73

CHAPITRE IV :	DISCUSSION.....	77
4.1	Qualité de la classification supervisée.....	78
4.2	Utilité des indices " NDVI " et "GEMI".....	82
4.3	Analyse spatiale et temporelle des feux.....	89
4.4	Relations entre les paramètres géophysiques et la localisation des feux.....	90
4.5	Relations entre les paramètres climatiques et la localisation des feux.....	92
4.6	Secteurs à risque élevé d'incendies.....	97
CONCLUSION.....		100
RÉFÉRENCES.....		105
ANNEXE 1.....		109
ANNEXE 2.....		111
ANNEXE 3.....		115

LISTE DES CARTES

1- Carte de localisation de la région d'étude.....	13
2- Accentuation linéaire de l'image satellitaire du 4 septembre 1994.....	15
3- Choix des bandes spectrales.....	18
4- Classification dirigée de la forêt boréale du Québec.....	26
5- Domaines climaciques et régions écologiques du Québec boréal	29
6- Les feux de 15 000 hectares et plus, 1972 à 1994	34
7- Les feux non répertoriés	38
8- Synthèse des feux répertoriés et non répertoriés	40
9- Géologie du Québec boréal	50
10- Dépôts de surface du Québec boréal	52
11- Relief du Québec boréal	55
12- Les températures moyennes annuelles du Québec boréal, 1951 à 1980	60
13- Les températures maximales moyennes en juin du Québec boréal, 1951 à 1980	63
14- Moyenne des précipitations totales annuelles du Québec boréal, 1951 à 1980	65
15- Moyenne des précipitations totales en juin du Québec boréal, 1951 à 1980	67
16- Moyenne des précipitations nivales annuelles du Québec boréal, 1951 à 1980	68
17- Localisation des stations météorologiques	70
18- Niveaux kérauniques horaires sur une moyenne annuelle au Canada, 1953 à 1983..	75
19- L'indice de végétation "NDVI" pour la caractérisation de la forêt boréale du Québec	83
20- L'indice de végétation "GEMI" pour la caractérisation de la forêt boréale du Québec	85
21- Les grands incendies de forêt de 1995.....	98

LISTE DES TABLEAUX

1- Principales caractéristiques des satellites NOAA.....	6
2- Différenciation des indices "NDVI" et "GEMI" pour différentes surfaces.....	9
3- Procédure de la classification.....	21
4- Classes des différentes surfaces pour la classification.....	22
5- Méthodologie de la recherche.....	23
6- Sommaire de chacune des classes.....	27
7- Écart de superficie de 5 feux observés.....	31
8- Classification des grands feux, 1972 à 1994.....	35
9- Statistiques des feux de plus et moins de 15 000 hectares.....	41
10- Feux de la zone à protection intensive.....	45
11- Températures et précipitations moyennes annuelles des 13 stations météorologiques	72
12- Matrice de confusion de la classification.....	79
13- Comparaison des indices "NDVI" et "GEMI" pour les images satellitaires du 14 juin et 1 juillet 1993.....	86
14- Comparaison des indices "NDVI" et "GEMI" pour les images satellitaires du 28 août 1993 et du 4 septembre 1994.....	87
15- Moyennes de la superficie brûlée de la forêt boréale du Québec.....	91
16- Facteurs d'influence pour le déclenchement d'un grand feu de forêt.....	103

LISTE DES GRAPHIQUES

1- Feux de 15 000 hectares et plus, 1972 à 1994.....	33
2- Superficie des feux de plus et de moins de 15 000 hectares.....	42
3- Feux de moins de 15 000 hectares.....	43
4- Superficie des feux de moins de 15 000 hectares.....	44
5- Superficie des feux dans la zone à protection intensive, 1972 à 1994.....	46
6- Début des feux de 15 000 hectares et plus, 1972 à 1994.....	47
7- Début des feux de 15 000 hectares et plus, en mois et en semaines.....	48

INTRODUCTION

Depuis déjà plusieurs années, on étudie et cartographie les feux de forêt de petites et de grandes tailles, soit parce qu'ils ont un rôle très important sur les écosystèmes forestiers et/ou pour les risques qu'ils occasionnent à la population et à la ressource même. Dans cette optique, la cartographie est très utile pour étudier ce phénomène, surtout pour la planification et l'organisation des ressources naturelles (Chuvieco et Martin, 1994). Or, la cartographie traditionnelle n'a pas encore apporté une vision globale en ce qui concerne l'étude des grands ensembles biophysiques tels que les feux de forêt. La télédétection par satellites Landsat et Spot n'a pas permis une vision instantanée et globale dû à une faible répétition qui est de 16 et 26 jours respectivement. Les images NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) des satellites Tiros offrent de nouvelles possibilités et sont plus appropriées (1 à 2 passages par jour au même endroit) pour l'étude de grands phénomènes dynamiques couvrant de grands espaces tel que le couvert forestier du Québec boréal. À ce titre, avec la réception quotidienne d'images NOAA du Laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi, il est intéressant de cartographier et d'étudier les grands incendies de forêt, anciens et nouveaux, situés dans les domaines de la pessière de la forêt boréale tout en tenant compte de la cartographie traditionnelle existante. Les bandes spectrales 1, 2 et 3 du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) ont été retenues afin d'obtenir le meilleur rehaussement des feux de forêt.

Précisément, à l'aide de la télédétection, la recherche s'oriente sur la cartographie des grands feux de forêt (15 000 hectares et plus) survenus de 1972 à 1994. La production d'une carte synthèse couvre la période en cause.

À partir du traitement numérique d'une image satellitaire, il y a description du couvert forestier de la zone d'étude à l'aide d'une classification supervisée par maximum de vraisemblance. De plus, avec la cartographie traditionnelle, plusieurs questions sont soulevées concernant la répartition géographique des feux, leur fréquence, leur densité et leurs relations avec certains paramètres de géographie physique et bioclimatiques tels que la géologie, les dépôts meubles, le relief, les précipitations, les températures et la fréquence de la foudre. Ceci permet de voir des liens existant entre ces derniers éléments et la localisation des grands incendies de forêt.

L'objectif général de cette recherche est d'étudier et de cartographier les grands incendies de forêt. À cela s'ajoutent trois objectifs spécifiques, d'abord: 1) explorer les possibilités et les limites des images NOAA dans la classification des grands ensembles biophysiques et la cartographie des grands feux de forêt ; 2) étudier certains paramètres de géographie physique et climatiques pouvant expliquer la répartition spatiale et temporelle de ces grands feux situés dans la forêt boréale québécoise ; 3) faciliter la prédiction des incendies de forêt spécialement provoqués par la foudre à l'aide d'éléments supplémentaires.

CHAPITRE I REVUE DE LITTÉRATURE

CHAPITRE I REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Rôle et conséquences des feux dans la forêt boréale

Pris dans leur ensemble, les feux de forêt ont des impacts majeurs aux niveaux local, régional et global sur les écosystèmes. À court et moyen terme, ils changent les caractéristiques de la végétation, amenant la transition d'une espèce à une autre (Belward *et al.*, 1993), tout en modifiant le paysage forestier. De plus, ils (particulièrement les feux d'origine humaine en régions tropicales) entraînent une quantité non négligeable de gaz affectant la chimie atmosphérique. Le brûlis de la végétation entraîne des répercussions sur l'écologie en général, spécialement en milieux semi-arides (Chuvienco et Martin, 1994).

Or, en milieu boréal, les incendies de forêt semblent avoir des conséquences différentes. Ils n'ont pas que des répercussions négatives. En effet, ils influencent les cycles des nutriments et maintiennent la diversité, la productivité et la stabilité à long terme des écosystèmes (Heinselman 1973). De plus, ils demeurent essentiels pour ces derniers et jouent un rôle très important dans leur évolution et leur fonctionnement (Carleton 1982, Cogbill 1985, Heinselman 1973, Foster 1985, Rowe et Scotter 1973, Van Wagner 1978, Viereck 1983, Riverin 1994). Entre autres, ils enclenchent le renouvellement par graines de certaines essences forestières, telles que l'épinette noire et le pin gris (Heinselman 1973 et Riverin 1994). Les feux sont donc très importants pour la compréhension du paysage et demeurent associés au couvert végétal et au contexte climatique du domaine forestier boréal (Delcourt *et al.*, 1983 et Riverin 1994).

1.2 Avantages des images NOAA

La télédétection est un outil de plus en plus important pour la gestion et la compréhension des feux de forêt. Même si les satellites ne peuvent encore remplacer complètement les méthodes actuelles de surveillance des feux, il n'en demeure pas moins qu'ils constituent un complément rapide et peu coûteux, surtout pour les régions forestières éloignées (Flannigan et Haar, 1986). Dans un premier temps, la télédétection contribue à la prévention de ceux-ci et optimise l'organisation des ressources en nous renseignant sur les conditions de risques d'incendies, sur la valeur et la qualité de la ressource forestière, les conditions météorologiques et sur la topographie. Deuxièmement, elle est associée aux feux-mêmes, c'est-à-dire à la détection et à la gestion des feux en action et à la cartographie de ceux-ci (Chuvieco *et al.*, 1994) .

À ce titre, les satellites Tiros de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) semblent faire partie du meilleur système satellitaire pour l'étude des feux de forêt (Flannigan et Haar, 1986) en offrant de grands avantages : une grande partie du territoire peut être couverte par une seule image; la forte résolution du capteur AVHRR intégré à ces satellites (1,1 kilomètres au nadir) permet d'apprendre les variations locales. Les images donnent certaines réponses à des problèmes qui se présentent à l'échelle régionale et nationale. En plus, elles peuvent être captées chaque jour à de faibles coûts (Lopez *et al.*, 1991).

Ce même capteur AVHRR est composé de cinq canaux, dont un dans le visible (1), un deuxième dans le proche infrarouge (2) et trois dans l'infrarouge thermique (3, 4 et 5) (voir le

tableau 1). Le canal 3 du thermique moyen semble le plus adapté pour la détection des feux de grande importance (Malingreau 1990, Chuvieco et Martin, 1994, Lopez *et al.*, 1991), demeurant le plus sensible aux sources de chaleur et le plus utilisé à cet effet. Toutefois, certains problèmes opérationnels peuvent survenir avec le canal 3. En effet, ce canal démontre une faible sensibilité thermique qui est saturée à 320° Kelvin, entraînant de la confusion entre les feux de forêt et certaines surfaces telles que des feux d'abattis ou des sols à nu (Chuvieco et Martin, 1994).

TABLEAU 1 : PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SATELLITES NOAA

LES SATELLITES NOAA	
COUVERTURE AU SOL:	2 400 kilomètres
ANGLE DE PRISE DE VUE:	±55.4°
ALTITUDE:	833 kilomètres
LONGUEUR D'ONDE (µm):	Bande 1: 0,580 - 0,680
	Bande 2: 0,725 - 1,100
	Bande 3: 3,550 - 3,930
	Bande 4: 10,300 -11,300
	Bande 5: 11,500 -12,500

Source: Malingreau, 1990.

La canal 3 discrimine moins bien les nuages que les canaux 4 et 5, ce qui entraîne une certaine contamination au niveau des feux (Flannigan et Haar, 1986). De plus, plusieurs auteurs (Chuvieco et Martin, 1994, Flannigan et Haar, 1986, Touré *et al.*, 1993, Frederiksen

et al., 1989, Kaufman *et al.*, 1989) mentionnent le problème de surestimation de la superficie des feux, entraîné par cette faible sensibilité du canal 3 et expliqué par la saturation d'un pixel donné même si ce dernier n'est occupé que partiellement par un feu. À titre d'exemple, les expériences de Chuvieco et Martin (1994), dans le bassin Amazonien, démontrent une exagération de 43 % de la dimension des feux, soit une fois et demie supérieure en les comparant avec leurs observations provenant des satellites Landsat TM. Ils apportent une correction telle que proposée par Matson et Dozier (1981), utilisant une méthode qui calcule la différence de brillance (radiance) entre les bandes 3 et 4. D'autres chercheurs ont indiqué une surestimation de 30% pour les superficies brûlées dans le territoire d'étude situé au Nord du Sénégal (George *et al.*, 1993). Ces derniers utilisent une méthodologie basée sur la relation linéaire entre la proportion de pixels jugés brûlés et les valeurs de la bande 2. Leur méthode réduit l'erreur jusqu'à 4% en les comparant avec les données offertes par les images Landsat.

Les images NOAA peuvent être aussi utilisées pour la cartographie de petits incendies de forêt. Certains chercheurs tels que Flannigan et Haar (1986) ont démontré qu'il est possible d'en repérer et cartographier avec des superficies aussi faibles qu'un hectare, en utilisant une technique multispectrale comprenant les bandes 3 et 4 du capteur AVHRR. Cela nous confirme davantage l'utilité des images NOAA en ce qui concerne l'étude de phénomènes aussi dynamiques que les incendies de forêt.

1.3 Prédiction des feux de forêt

L'utilisation des images NOAA pour l'étude et la prévision des feux de forêt est relativement récente (Lopez *et al.*, 1991) comparativement aux modèles mathématiques et informatiques de prédiction utilisés depuis plus de vingt ans déjà. La recherche dans ce

domaine a toujours fait ressortir une différence entre les feux d'origine humaine et ceux causés par la foudre. Conséquemment aux feux de foudre, les indices courants pour estimer l'état de la végétation (essentiels à la prévision des feux) sont la température, l'humidité de l'air et la direction des vents (Chuvieco et Martin, 1994). Or, pour des images satellitaires NOAA ou autres, Tucker (1979) a proposé l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), une combinaison des bandes 1 et 2 du capteur AVHRR, qui non seulement a comme avantages de rehausser les contrastes dans la végétation et de minimiser l'effet des variations des conditions atmosphériques entre des images captées à des dates différentes (Beaubien et Simard, 1993), mais aussi d'informer sur l'état de santé et sur l'évolution de la végétation, en faisant une analyse multitemporelle à l'aide de ces images NOAA (Lopez *et al.*, 1991, Chuvieco et Martin, 1994).

Une des variables importantes à connaître pour la prédiction des feux est l'humidité de la végétation. À ce titre, l'indice NDVI apporte certaines corrélations entre des images NOAA prises hebdomadairement et l'évolution de certaines variables météorologiques telles que les précipitations et les maxima de température associés à la direction et à la vitesse du vent. Les données NDVI sont sensibles aux variations climatiques, nous indiquant entre autres les dommages occasionnés par des périodes de sécheresse précédant des feux (Malingreau *et al.*, 1985), surtout au printemps et à l'été. Ces variations étant reliées à l'activité végétale peuvent être détectées par les changements apportés par le NDVI (Lopez *et al.*, 1991).

Il existe plusieurs autres indices pour discriminer la végétation. En particulier, certains chercheurs (Pinty et Verstraete, 1992) ont mis sur pied le GEMI (The Global Environment Monitoring Index) qui utilise également une combinaison des bandes 1 et 2. Le traitement plus élaboré que l'indice NDVI (voir le tableau 2), demeure plus sensible à la végétation

clairesemée, moins sensible à la contamination atmosphérique et aux changements de couleurs du sol, en plus d'être excellent pour la détection des nuages (Flasse et Verstraete, 1993). Malheureusement, peu ou pas de chercheurs l'ont utilisé pour l'étude des feux de forêt. Toutefois, grâce à un stage effectué à l'Université Laval à l'automne 1994, nous avons constaté que le GEMI fait ressortir davantage les feux de forêt comparativement à d'autres surfaces.

TABLEAU 2 : DIFFÉRENTIATION DES INDICES NDVI ET GEMI

	VÉGÉTATION		SOLS		EAU	
	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI
VÉGÉTATION	----	----				
SOLS	Bonne	Excellente	----	----		
EAU	Excellente	Excellente	Excellente	Faible	----	----
NUAGES	Bonne	Excellente	Faible	Excellente	Bonne	excellente

Source: Flasse et Verstraete, 1993

Certains chercheurs de l'Institut forestier national de Petawawa (Forêt Canada) ont mis sur pied des systèmes de prédiction de feux de forêt assez efficaces surtout pour la prévision à court terme, soit pour les feux d'origine humaine ou pour les feux de foudre. Nous parlerons ici spécialement du système de prédiction des incendies causés par la foudre puisqu'ils représentent la majorité des feux étudiés et cartographiés dans le présent projet de recherche. Le système de prédiction des feux de foudre repose essentiellement sur leurs connaissances acquises de la physique de la foudre, sur des expériences de laboratoire à l'aide des processus d'allumage (par simulation de la foudre) et de combustion lente des

combustibles forestiers, des réseaux de capteurs qui détectent la foudre ainsi qu'à l'aide des bases de données constituées sur les conditions météorologiques (précipitations, humidité relative, vitesse du vent) et sur les types de combustibles forestiers (Kourtz et Todd, 1993).

Ils accordent une grande importance aux types d'orage qui déclenchent les incendies de forêt, les gros orages accompagnés de milliers d'éclairs pouvant n'allumer aucun incendie comparativement aux petits qui peuvent à leur tour en allumer un à chacun des éclairs, et à la période dans la journée où se déclenchent les incendies. Ils mentionnent qu'une cellule orageuse active qui déverse peu ou pas de pluie sur des combustibles forestiers secs allumera des douzaines de feux rapprochés qui provoqueront de gros incendies s'ils ne sont pas décelés et combattus à temps.

De plus, ils affirment que leurs résultats sont bons pour les feux causés par les orages petits et moyens qui surviennent en matinée et pour les orages moyens et gros de nuit. Par contre, leurs prévisions sont moins fiables pour les orages d'après-midi, en raison du manque d'information sur les précipitations pour cette période de la journée, influençant ainsi leur estimation de l'humidité des combustibles. Mais, ce qu'il faut surtout retenir de leurs recherches, c'est que la prédiction des feux de forêt est un domaine très complexe où nous devons tenir compte de plusieurs facteurs en les liant tous ensemble. Pour ce qui est des feux de foudre, avoir de l'information sur l'état de la végétation demeure très important, où intervient d'ailleurs la télédétection. Mais il nous faut acquérir également beaucoup de connaissances sur la physique de la foudre, sur les types d'orage qui se produisent aux latitudes moyennes et sur d'autres données critiques comme la densité du combustible, la profondeur de la couche organique et sur des renseignements plus détaillés sur les précipitations.

CHAPITRE II MÉTHODOLOGIE

CHAPITRE II MÉTHODOLOGIE

2.1 Localisation du territoire à l'étude

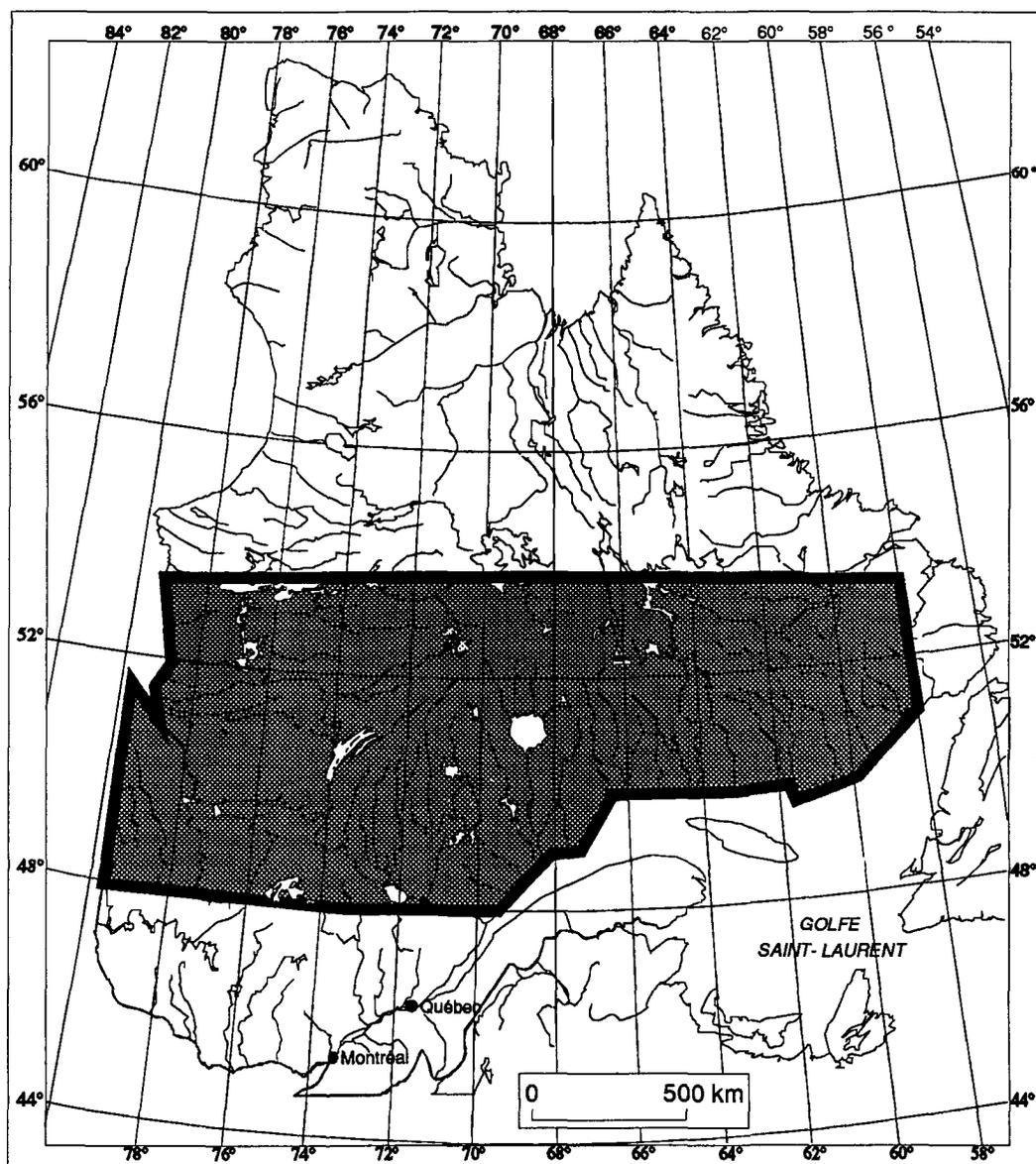
La zone d'étude de la présente recherche (voir la carte 1) comprend tout le territoire inclus entre les parallèles 48 et 53 Nord et les méridiens 59 et 80 Ouest, à l'exception faite de la péninsule gaspésienne et de l'île d'Anticosti. Elle couvre environ 70 000 000 d'hectares ou 700 000 kilomètres carrés. C'est la zone coniférienne du Québec méridional, incluant une partie de la forêt mixte aux alentours de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. C'est une zone principalement dominée par la pessière noire à mousses et la pessière noire à sapin et mousses (Thibault, 1985).

2.2 La cartographie numérique

D'abord, le matériel utilisé pour la cartographie à partir d'une image satellitaire est le suivant : une image NOAA composée des données numériques du capteur AVHRR. Cette image fut traitée (en utilisant les cinq bandes) sur deux ordinateurs SUN (Sparc10 et 20) à partir du logiciel de traitement d'images "Easi/Pace version 5.3 de PCI " du Laboratoire de télédétection de l'UQAC. Après avoir traité les images numériques, nous avons réalisé le montage cartographique sur un autre ordinateur, de type IBM, à partir du logiciel de dessin Corel Draw version 4.0.

Carte 1

LOCALISATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE (LA FORÊT BORÉALE QUÉBÉCOISE)



Source: Laboratoire de géographie de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

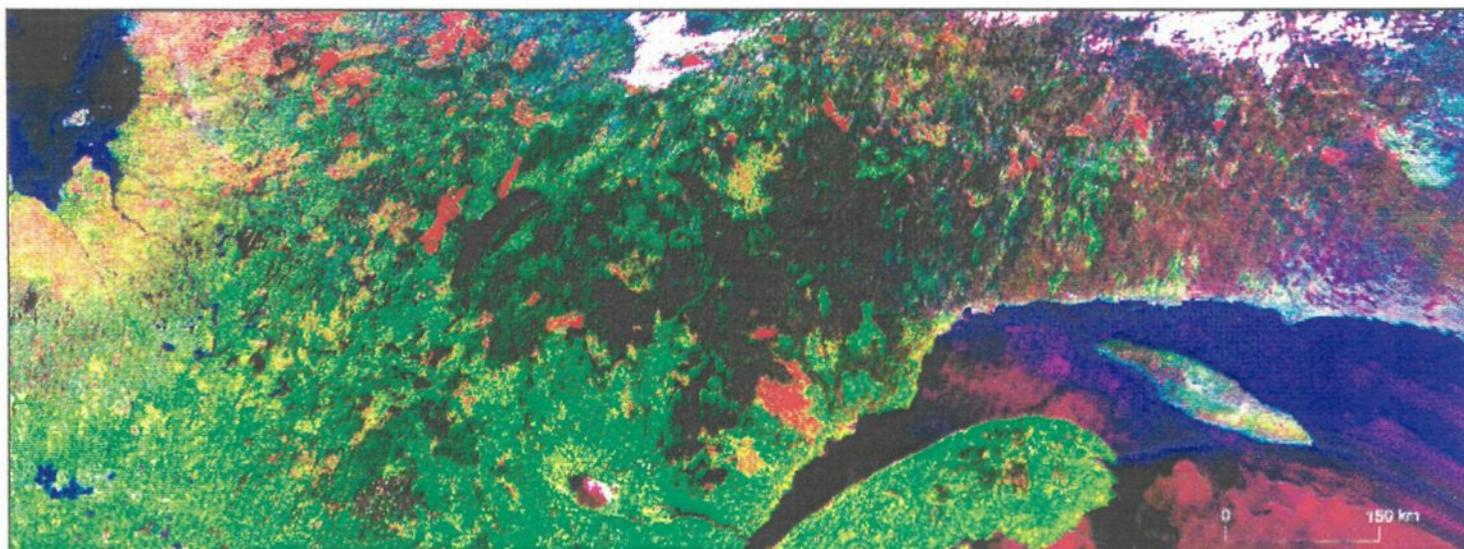
2.2.1 Sélection de l'image de base

Le Laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi avec STAR/IMSAT (Station de réception des images satellitaires de l'UQAC) reçoit à chaque jour des images satellitaires NOAA couvrant à chaque fois 2 400 kilomètres de largeur par quelques milliers de hauteur. Leurs grandes superficies offrent une vue globale très intéressante en ce qui concerne l'étude de phénomènes dynamiques tels que les incendies de forêt. Une des images captées le 4 septembre 1994 fut retenue pour la cartographie des grands feux de forêt. À partir de cette image couvrant 2 048 pixels de largeur par 2 232 lignes de hauteur (45 méga-octets au total), il a été possible de faire une sous-image de 1 291 pixels par 519 lignes afin de couvrir toute la zone d'étude. La netteté de cette sous-image est très bonne malgré quelques nuages au Nord du territoire en question (voir la carte 2 qui présente principalement les trois canaux utilisés pour la partie cartographique). Cette sous-image numérique a servi de base pour la production des cartes suivantes : la carte de la meilleure combinaison des bandes spectrales, celles avec les indices de végétation NDVI et GEMI, les cartes des feux de 1972 à 1994, enfin la dernière représentant une classification supervisée de toute la zone d'étude.

2.2.2 Corrections géométriques

Les divers capteurs satellitaires créent des images numériques déformées difficiles à superposer aux projections cartographiques courantes. Ces distorsions sont occasionnées par l'environnement observé (courbure de la Terre, variation d'altitude du sol, etc.), par des erreurs des systèmes de mesure et par le mouvement de la plate-forme des satellites (Bonn et

COMBINAISON MULTIBANDE ET ACCENTUATION LINÉAIRE DE L'IMAGE SATELLITAIRE DU QUÉBEC BORÉAL



Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

	Canal 1 (Rouge du visible)	0,580 - 0,680 μm
	Canal 2 (Proche infrarouge)	0,725 - 1,100 μm
	Canal 3 (Infrarouge thermique)	3,550 - 3,930 μm

Rochon, 1993). Ceci nous amène à devoir faire des transformations spatiales de ces images à l'aide de certaines méthodes de correction géométrique.

Il faut toutefois mentionner que pour cette recherche, nous avons considéré des méthodes de correction géométrique de base servant uniquement à géoréférencer l'image retenue sans pouvoir compenser la courbure terrestre, laissant par le fait même certaines distorsions que l'on retrouve particulièrement aux extrémités de l'image. Ainsi, les résultats obtenus ne permettent pas encore la superposition exacte de cette image à une carte géoréférencée. L'image satellitaire, préalablement sélectionnée, a été corrigée et redressée par calage cartographique de points de contrôle géographiques connus. Les 17 points de contrôle ont été redressés aux moyens des étapes suivantes :

- Localisation des points de repère sur l'image à corriger et sur le système de référence utilisé pour l'entrée directe des données en longitude et latitude des 17 points de contrôle (pris surtout à partir du réseau hydrographique) répartis le plus souvent possible au contour et au centre de l'image (voir l'annexe 1 pour la liste des points de contrôle et leurs valeurs résiduelles);
- Définition de la fonction mathématique polynomiale d'ordre 3 établissant la correspondance entre les deux systèmes;
- Application de cette fonction à l'ensemble des points de contrôle pour en vérifier la précision en analysant les erreurs résiduelles entre les valeurs obtenues à l'aide de cette fonction et les valeurs réelles de contrôle;

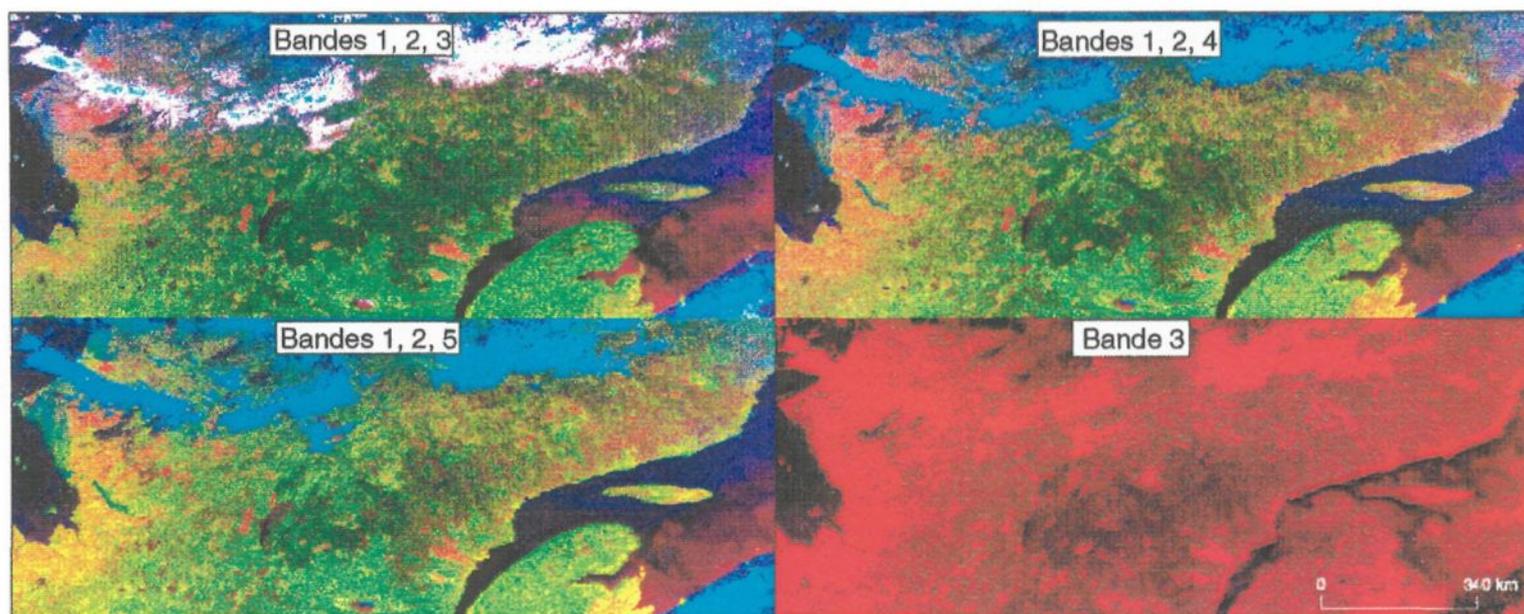
- Modification de la fonction mathématique en éliminant d'abord un et ensuite deux points de contrôle présentant les plus mauvaises valeurs résiduelles et en modifiant le degré du polynôme afin d'obtenir une précision satisfaisante.

2.2.3 Choix des bandes spectrales

Le capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites NOAA offre cinq bandes spectrales (voir le tableau 1), dont le rouge dans le visible (canal 1), le proche infrarouge (canal 2), le thermique moyen (canal 3), et deux thermiques lointains (canaux 4 et 5). Les trois bandes thermiques ont été étudiées en les combinant à tour de rôle aux bandes 1 et 2 afin de faire ressortir davantage les feux de forêt (voir la carte 3). Cette carte démontre principalement les diverses compositions multibandes possibles et le niveau spectral de chacune des bandes.

La combinaison des bandes 1, 2 et 3 fut retenue pour la cartographie des feux, par le fait que la bande 3 se rapproche le plus du rayonnement du spectre électromagnétique des aires incendiées, localisé entre 5,8 et 2,9 μm . Cette bande demeure aussi plus efficace pour la cartographie des grands feux (Chuvienco et Martin, 1994). De plus, bien qu'éteinte, l'aire de feu apparaît chaude, dû à l'absorption par conduction du rayonnement solaire pendant le jour, car la surface incendiée présente des bois calcinés et du charbon noir qui absorbent abondamment la chaleur solaire et émettent beaucoup d'énergie détectable par le capteur. Chacune des combinaisons précédentes ont été traitées en fausses couleurs sur écran cathodique en y attribuant le canon rouge pour la bande thermique, le canon vert pour la bande 2 du proche infrarouge et le canon bleu pour la bande 1 correspondant au spectre rouge du visible.

ACCENTUATION DES FEUX DE FORÊT DU QUÉBEC BORÉAL PAR DIVERSES COMPOSITIONS MULTIBANDES DU CAPTEUR AVHRR



Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

	Bande 1 (Rouge du visible)	0,580 - 0,680 μm
	Bande 2 (Proche infrarouge)	0,725 - 1,100 μm
	Bande 3 (Infrarouge moyen)	3,550 - 3,930 μm
	Bande 4 (Infrarouge thermique)	10,300 - 11,300 μm
	Bande 5 (Infrarouge thermique)	11,500 - 12,500 μm

2.2.4 Rehaussement linéaire des bandes 1, 2 et 3

Pour faciliter la cartographie des feux de forêt à l'aide de l'image satellitaire préalablement sélectionnée, un rehaussement linéaire des trois canaux retenus fut réalisé et réaccentué par segmentation des pics des histogrammes correspondant aux surfaces incendiées. Des couleurs artificielles ont été attribuées aux trois bandes, le rouge pour la bande thermique (3) faisant ainsi ressortir les feux de forêt en rouge, le vert pour le proche infrarouge (2) associé à la végétation et le bleu pour la bande 1 affectée à la réflectance des sols et des minéraux.

2.2.5 Indice de végétation NDVI

Afin de vérifier la possibilité de faire ressortir davantage les feux de forêt, nous avons appliqué sur une copie de l'image de base l'indice de rehaussement de la végétation le plus couramment utilisé pour des images satellitaires : le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). C'est une combinaison spectrale de la bande rouge du visible et de la bande du proche infrarouge correspondant aux bandes 1 (C₁) et 2 (C₂) du capteur AVHRR de NOAA. Voici donc la formule utilisée et élaborée par Tucker en 1979 :

$$\text{NDVI} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1}$$

Une carte a été élaborée à l'aide de cet indice (voir la carte 19) et commentée à la partie 4.2 de cette recherche.

2.2.6 Indice de végétation GEMI

Pour les mêmes raisons que le NDVI, nous avons appliqué également l'indice (GEMI) sur une copie de l'image de base du 4 septembre 1994. Le GEMI utilise les deux mêmes bandes que d'autres indices comme le NDVI (bandes 1 et 2). C'est un indice plus complexe qui nécessite plus de 25 opérations mathématiques. Voici donc la formule introduite par Pinty et Verstraete (1992) :

$$GEMI = n(1-0.25n) - \frac{Cr - 0.125}{1-Cr}$$

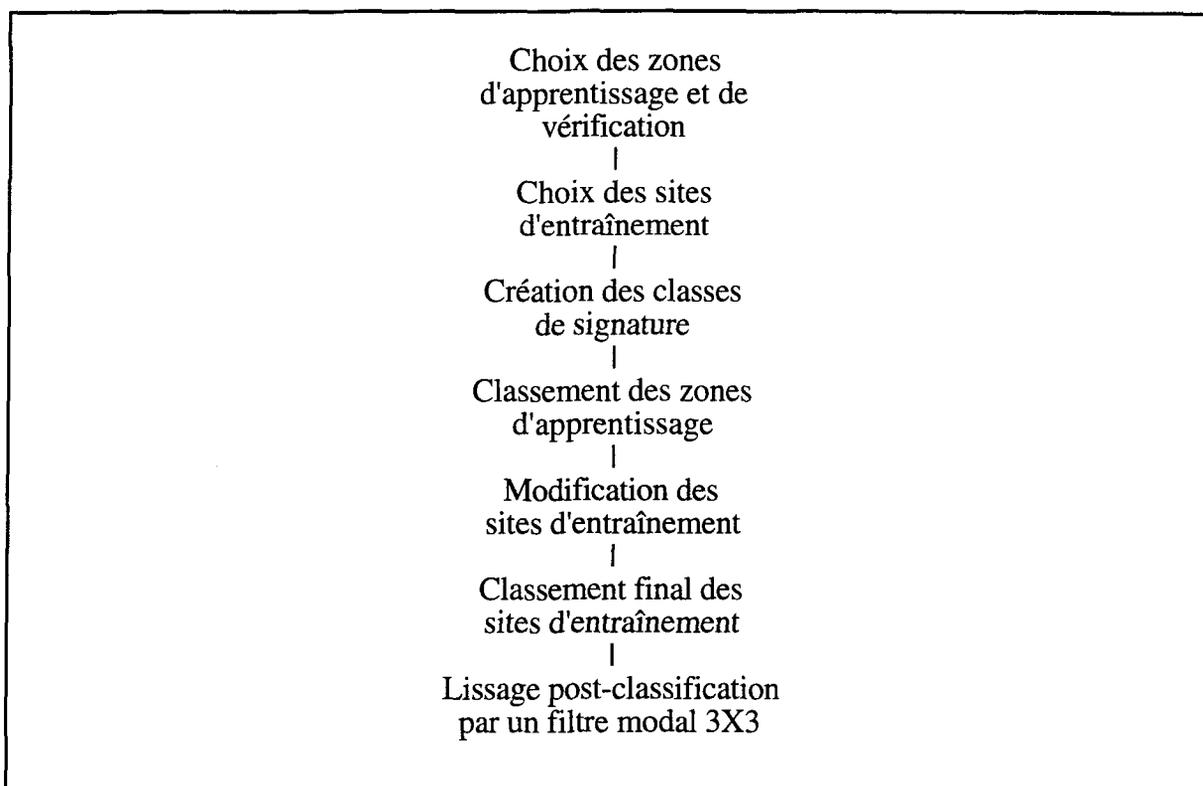
$$\text{ou } n = \frac{2(Cn^2 - Cr^2) + 1.5Cn + 0.5Cr}{Cn + Cr + 0.5} \quad \text{et } Cn = \text{canal 2} \quad Cr = \text{canal 1}$$

Une carte fut également réalisée pour cet indice et elle est commentée à la partie 2.4 de ce travail (voir la carte 20).

2.2.7 Classification supervisée

Pour faire la description de la végétation de la forêt boréale québécoise, nous avons procédé, à l'aide d'une classification supervisée par maximum de vraisemblance, à une interprétation automatisée de l'image de base préalablement accentuée. C'est un algorithme mathématique convenant bien pour le territoire en question et qui a donné de meilleurs résultats comparativement à d'autres méthodes utilisées comme la segmentation par distance minimale entre les classes. La classification (voir le tableau 3) a pour but de reconnaître automatiquement les signatures spectrales des objets au sol (ex.: la couverture végétale) en établissant préalablement des classes où s'identifie chacun de ces objets contenus dans la scène analysée (Bonn et Rochon, 1993).

TABLEAU 3 : PROCÉDURE POUR LA CLASSIFICATION



Précisément, à l'aide de données-terrain, de cartes forestières et thématiques, d'images satellitaires NOAA et Landsat, nous avons déterminé les classes d'objets à rechercher dans l'image (voir le tableau 4), fait des sites d'entraînement pour l'apprentissage avant de créer les classes de signatures qui nous permettent de situer ces objets dans l'espace spectral. Ensuite, nous avons procédé à une classification paramétrique par maximum de vraisemblance des sites d'entraînement sélectionnés et les avons modifiés afin d'améliorer la classification. Nous avons refait la classification par maximum de vraisemblance et finalement réalisé un lissage post-classification par un filtre modal 3 X 3 pixels pour homogénéiser le produit final en éliminant les unités trop petites (Bonn et Rochon, 1993).

TABLEAU 4: THÈMES DES DIFFÉRENTES SURFACES

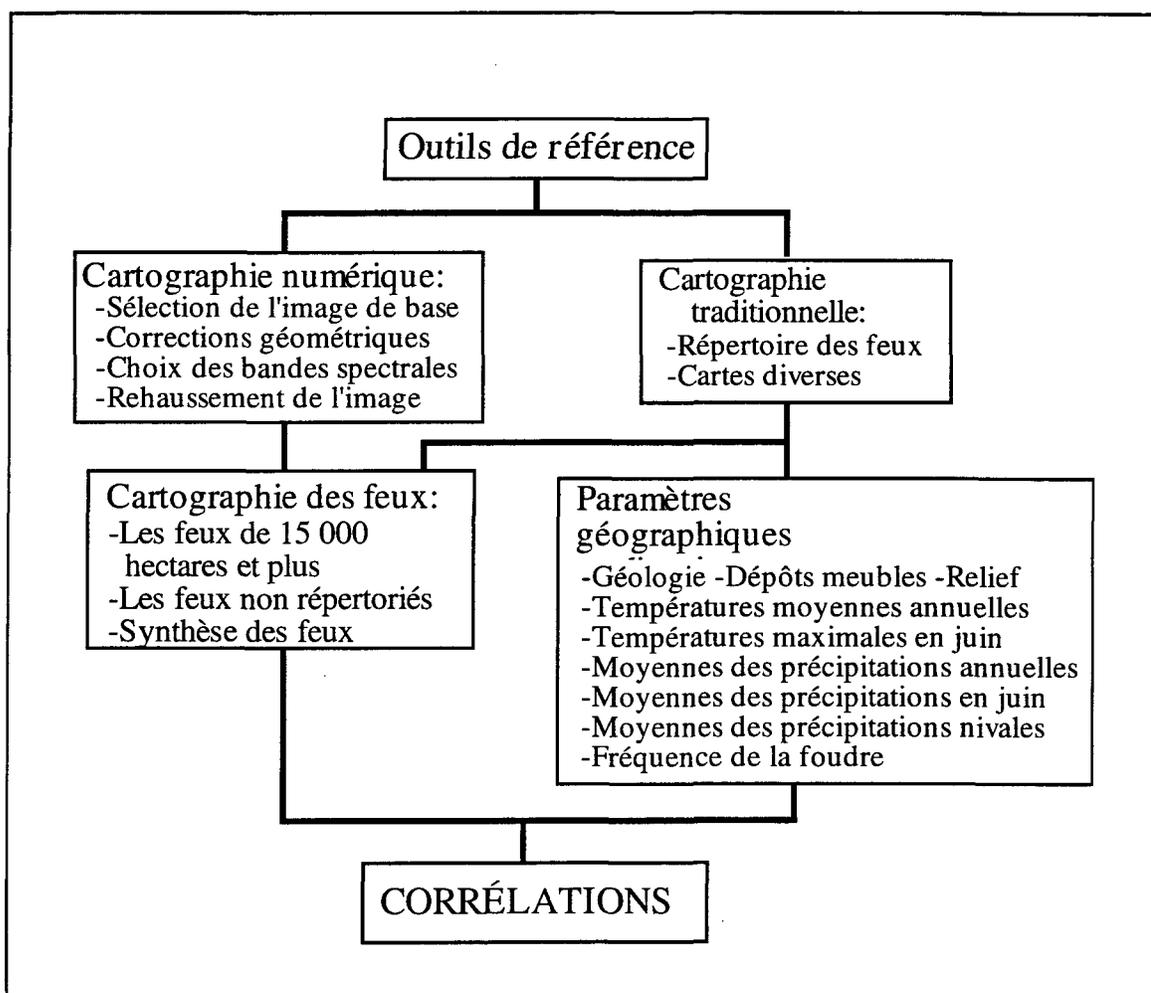
THÈMES DES DIFFÉRENTES SURFACES	SITES D'ENTRAÎNEMENT	COULEUR ASSOCIÉE EN NIVEAU DE GRIS (Rouge, Vert, Bleu)
1- Feux récents	5	225, 000, 000
2- Feux anciens	7	255, 120, 000
3- Coupes forestières	8	215, 145, 095
4- Résineux	7	000, 175, 000
5- Mélangés à résineux	6	000, 255, 000
6- Mélangés à feuillus	5	175, 255, 000
7- Forêts ouvertes	6	225, 255, 000
8- Landes boisées	6	175, 225, 255
9- Zones agricoles	6	255, 255, 000
10- Zones urbaines	3	255, 100, 255
11- Zones marécageuses	4	200, 195, 000
12- Eau	8	000, 200, 255
13- Nuages	4	255, 255, 255

2.3 La cartographie traditionnelle

Plusieurs cartes thématiques ont été réalisées à partir de données provenant de sources multiples (cartes climatiques et de géographie physique, statistiques, répertoires, etc.). Toutes les cartes que l'on retrouve au chapitre suivant, à l'exception faite de la classification

forestière et des cartes des feux réalisées sur un ordinateur de type IBM avec le logiciel Corel Draw, ont été produites sur un ordinateur Macintosh à l'aide des logiciels de dessin suivants : Adobe Illustrator 5.0 et Freehand 5.0.

TABLEAU 5 : MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE



CHAPITRE III RÉSULTATS

CHAPITRE III RÉSULTATS

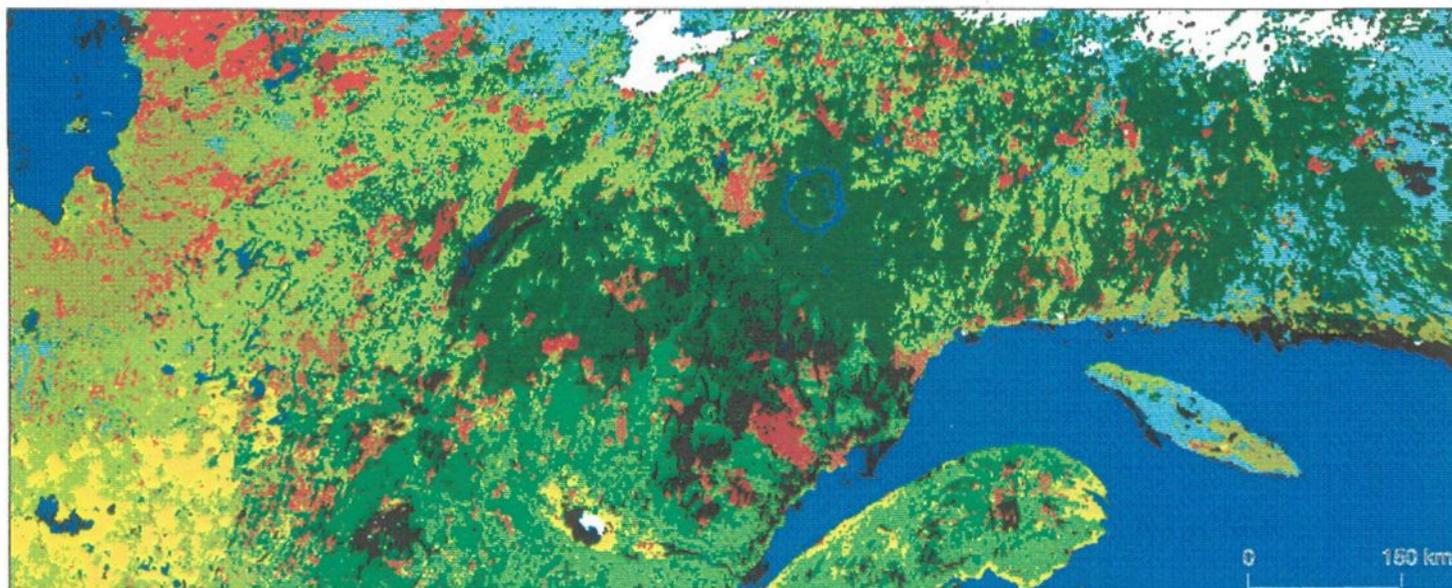
3.1 Description du couvert forestier

À partir de la classification supervisée de la région d'étude (voir la carte 4), nous remarquons que c'est la classe des résineux denses qui domine sur les autres classes, puisque 24,27% du territoire lui est associé (voir le tableau 6). Ces résineux se concentrent au centre du territoire étudié, compris principalement entre le lac Mistassini et l'est du réservoir Manicouagan. On retrouve également une forte concentration de résineux denses sur la moyenne Côte-Nord, à la longitude de l'Île d'Anticosti. Ensuite, presque 17%¹ du territoire est composé de résineux situés en milieu plus ouvert (forêts ouvertes). On les retrouve particulièrement au Nord de la région de l'Abitibi, à l'Ouest et au Nord-est du lac Mistassini. Cette classe comprend des milieux en régénération incluant des peuplements jeunes (Synthèse forestière du Québec, 1982). Des landes boisées, proches de la zone de végétation de la taïga (Saucier, 1991) se localisent au Nord du lac Mistassini entre les parallèles 52 et 53 Nord et dans un deuxième endroit, en basse et moyenne Côte-Nord. Ils constituent environ 7% de l'image classifiée.

Les deux classes de mélangés constituent 13% de la classification. D'abord, les mélangés à résineux se trouvent en bordure de la masse coniférienne dense située au Nord de

1- Ces pourcentages sont exprimés pour l'image complète qui inclut la zone d'étude ainsi que le Golfe Saint-Laurent et la péninsule gaspésienne (territoires non à l'étude).

LA FORÊT BORÉALE DU QUÉBEC



Classification supervisée de l'image du 4 septembre 1994,
captée au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC



TABLEAU 6 : SOMMAIRE DE CHACUNE DES CLASSES

CLASSES	NOMBRE DE PIXELS	SUPERFICIE (Hectares)	SUPERFICIE (%)
Feux récents	4 152	502 392	0,68
Feux anciens	22 039	2 666 719	3,60
Coupes	18 890	2 285 690	3,08
Résineux denses	148 747	17 998 388	24,27
Mélangés à résineux	43 044	5 208 324	7,02
Mélangés à feuillus	37 347	4 518 987	6,09
Forêts ouvertes	103 884	12 569 964	16,95
Landes boisées	44 020	5 326 420	7,18
Zones agricoles	22 852	2 765 092	3,73
Zones urbaines	7 514	909 194	1,23
Zones marécageuses	35 080	4 244 680	5,72
Eau	79 164	9 578 844	12,92
Nuages	11 464	1 387 144	1,87
Non-classifié	34 626	4 189 746	5,65
Total	612 823	74 151 584	100,00

Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et aussi dans les alentours du réservoir Gouin et du lac Saint-Jean. Les mélangés à feuillus dominent cette dernière région et entrecoupent les mélangés à résineux. De plus, on remarque des zones agricoles près des lacs Saint-Jean et Abitibi, des zones urbaines au Saguenay-Lac-Saint-Jean et des zones marécageuses réparties à deux endroits, soit aux alentours de la baie de James et sur les rivages de la moyenne et basse Côte-Nord. Ces classes représentent plus de 10% de la zone d'étude. En ce qui concerne les feux anciens et nouveaux, ils occupent 4,28% du territoire avec 3 169 111

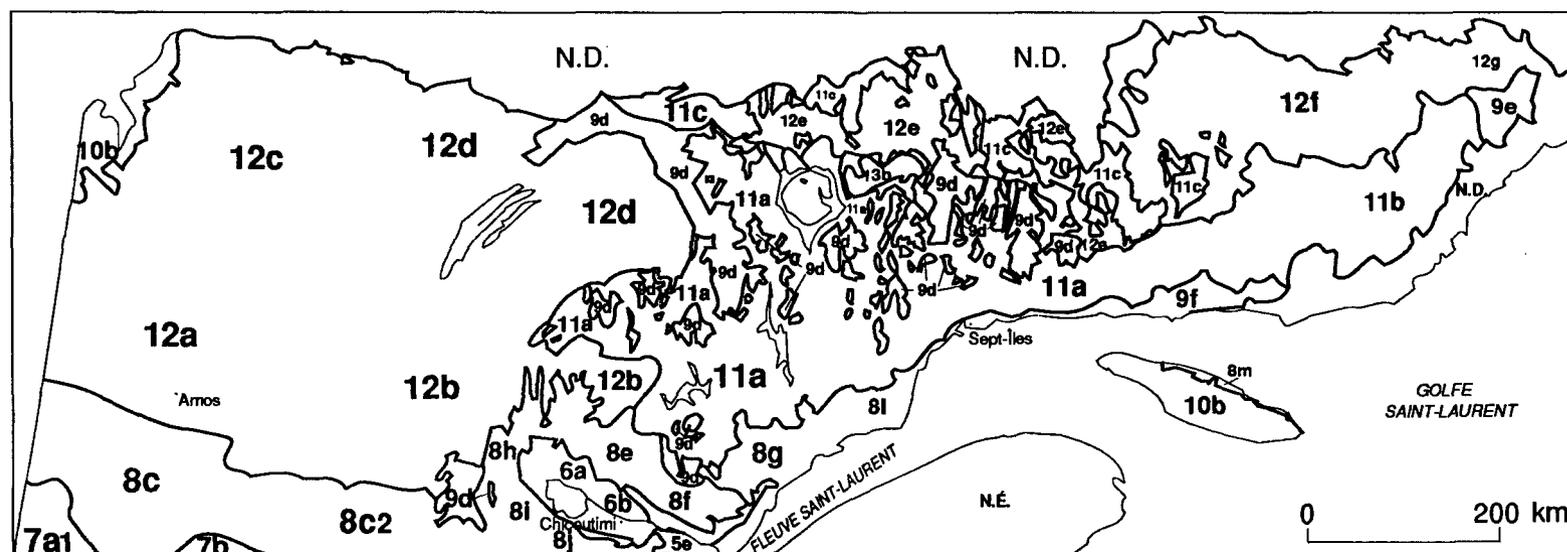
hectares. Selon la classification, la classe des coupes forestières occupe plus de 3% du territoire, c'est-à-dire plus de deux millions d'hectares. Comme nous le verrons plus tard, il existe beaucoup de confusion entre les coupes forestières et celle des feux anciens.

3.2 Sous-ensembles écologiques

La forêt boréale québécoise est divisée en deux principales zones forestières : la zone mélangée et celle qui nous intéresse le plus, la zone boréale. Chacune d'elles se subdivise en domaines climatiques et par la suite en régions écologiques (Thibault, 1985).

D'abord, dans le territoire à l'étude, la zone mélangée (5, 6 et 7) entoure presque exclusivement la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, composée de sapinières à bouleau jaune et à bouleau blanc. À l'extrême Sud-Ouest de la carte (voir la carte 5) se retrouvent deux petits domaines de bétulaies jaune à sapin (7a1 et 7b). Maintenant, pour ce qui est de la zone boréale, elle représente la grande majorité du territoire étudié, lequel est divisé en six domaines climatiques dominés principalement par les pessières noires à sapin et mousses et les pessières noires à mousses (voir l'annexe 2 pour la description de chacun des domaines climatiques et des régions écologiques).

RÉGIONS ÉCOLOGIQUES* ET DOMAINES CLIMACIQUES DU QUÉBEC BORÉAL



Source: Carte des régions écologiques du Québec méridional,
ministère des Ressources naturelles, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

Zone mélangée:

Sapinière à bouleau jaune : 5e

Sapinière à bouleau blanc : 6a, 6b

Bétulaie jaune à sapin : 7a1, 7b

Zone boréale:

Sapinière à bouleau blanc : 8e, 8f, 8h, 8i, 8j, 8l

Sapinière à épinette noire : 9d, 9e, 9f

Pessièrre blanche à sapin et sapinière à épinette blanche : 10b

Pessièrre noire à sapin et mousses : 11a, 11b, 11c

Pessièrre noire à mousses : 12a, 12b, 12c, 12d, 12e, 12f, 12g

Toundra alpine : 13b

N.D. : données non disponibles

N.É. : territoire écarté

* Voir l'annexe "a" pour la classification des régions écologiques

3.3 Cartographie des feux

3.3.1 Surestimation de la superficie des feux

Nous avons vu au chapitre premier, que certains chercheurs ont démontré la surestimation de la superficie des feux de forêt captés par des images satellitaires NOAA. Des problèmes reliés à la sensibilité de la bande thermique 3 en était la cause. Afin de vérifier leurs hypothèses, nous avons tenté d'estimer la superficie de cinq feux de régions différentes à partir de deux images NOAA et la comparer aux statistiques de superficie officielle du ministère des Ressources naturelles du Québec. Les deux images NOAA sont celle du 26 septembre 1992 pour les quatre premiers feux et celle du 4 septembre 1994 pour le cinquième. Ensuite, nous avons compté à l'écran le nombre de pixels pour chacun des feux avant de les comparer à la superficie officielle du ministère convertie en kilomètres carrés et en pixels (voir le tableau 7).

Après avoir fait les différents calculs, nous avons constaté un écart de 33% en moyenne pour les cinq feux étudiés. Même si les chercheurs en question comparaient les données NOAA avec des données Landsat, et non pas directement avec des statistiques officielles, nous pouvons effectivement voir qu'il existe une surestimation importante des feux. Les résultats obtenus sont du même ordre que ceux des chercheurs en question, étant respectivement de 43% et 30% (Chuvieco et Martin, 1994, Georges *et al.*, 1993).

TABLEAU 7 : SUPERFICIE DES FEUX OBSERVÉS

FEUX	SUPERFICIE DU MINISTÈRE		CONVERSION	PIXELS	ÉCART (%)
	HECTARES	KM ²	EN PIXELS ÉQUIVALENTS	OBSERVÉS SUR L'IMAGE	
1	151 000	1 510	1 373	2 300	40
2	96 400	964	876	1 225	29
3	14 800	148	135	223	39
4	9 770	98	89	130	32
5	30 000	300	273	330	29
Moyenne	60 394	604	549	842	33

Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

3.3.2 Feux de 1972 à 1994

Il faut premièrement préciser que nous avons cartographié ici les grands feux de 15 000 hectares et plus parce que nous voulons comparer leurs statistiques (superficie, localisation etc.) à celles de l'ensemble des feux retrouvés sur le territoire de recherche. Mentionnons aussi que le répertoire des feux du ministère des Ressources naturelles (servant de base pour nos statistiques) différencie les feux de plus et de moins de 15 000 hectares, facilitant ainsi leur localisation. De plus, la raison pour laquelle nous avons choisi la période de 1972 à 1994 se justifie par le fait que les dites statistiques ne sont complètes qu'à partir de 1972. Nous avons donc jugé qu'une période de plus de vingt ans était pour l'instant suffisante pour l'élaboration de cette recherche.

La carte des feux de 15 000 hectares et plus (voir la carte 6), faite à l'aide de l'image satellitaire du 4 septembre 1994, fait voir 54 grands feux répertoriés depuis 1972 sur le territoire à l'étude. Les pourtours de ces feux ont été transférés sur l'image satellitaire par superposition. L'image satellitaire nous offre la possibilité de bien localiser les feux car les signatures spectrales de ces derniers apparaissent comme des cicatrices qui permettent de les situer dans l'espace et ce, même dans le cas des feux datant de plus de vingt ans. À ce sujet, nous avons constaté qu'il est plus facile de localiser un feu ancien au Nord comparativement à un feu de même date situé plus au Sud, et ceci dans le même type de végétation. Cela nous porte à croire que la régénération se fait plus lentement au Nord qu'au Sud.

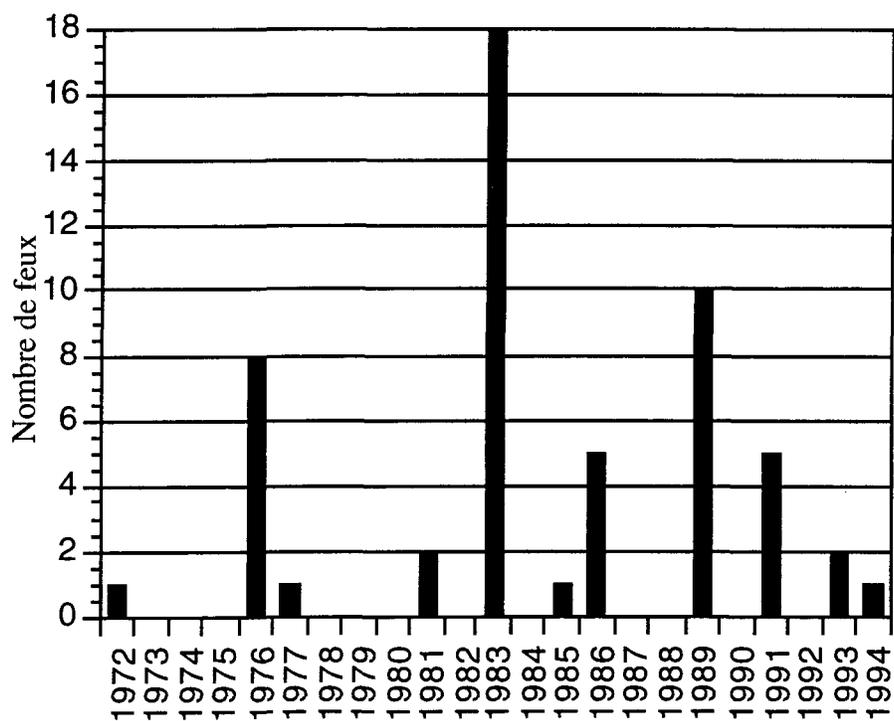
Le choix des classes de feux fut précisé à l'aide de l'histogramme des feux (voir le graphique 1) répertoriés depuis 1972 qui nous permet de constater que certaines périodes ont été plus touchées que d'autres. À des fins purement statistiques, certains auteurs et statisticiens nous proposeraient un nombre de classes compris entre 7 et 15, mais ce n'est pas le cas ici car nous voulons surtout distinguer les feux anciens et nouveaux qui couvrent la zone d'étude. Donc, quatre classes comprenant des intervalles de six ans, sauf pour la quatrième avec cinq années, ont été retenues afin de couvrir l'ensemble des 23 années et des 54 feux répertoriés. La première classe (voir le tableau 8) couvre les années 1972 à 1977 et inclut 10 feux, soit 19% de l'effectif total; la deuxième (1978 à 1983) avec 20 feux, soit 37% du nombre total; la troisième classe est celle des années 1984 à 1989 avec 16 feux (29%) et la dernière classe (1990 à 1994) comprend 8 feux, c'est-à-dire 15% du total.

Nous pouvons remarquer l'importance du nombre de feux dans la troisième classe, ceci étant spécialement dû à l'année 1983 qui a été très marquée par les incendies de forêt, avec 18

sur 54 répertoriés, représentant 33% du nombre total. C'est donc l'année la plus importante pour le nombre de feux dans la région d'étude, mais pas en ce qui concerne la superficie brûlée. Nous y reviendrons au chapitre 3.4.

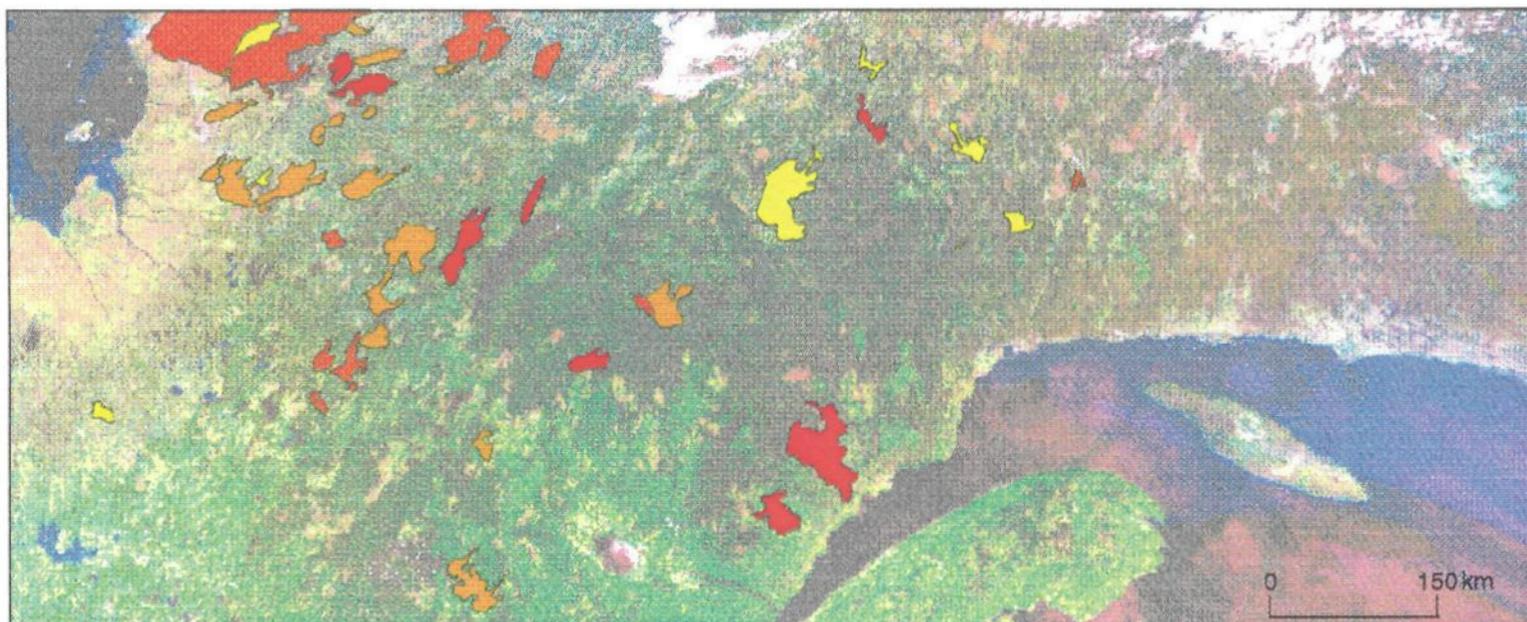
GRAPHIQUE 1

FEUX DE 15 000 HECTARES ET PLUS 1972 À 1994



Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

FEUX DE 15 000 HECTARES ET PLUS DU QUÉBEC BORÉAL 1972 À 1994



Sources: -Ministère des Ressources naturelles, Québec
-Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

- 1972 à 1977
- 1978 à 1983
- 1984 à 1989
- 1990 à 1994

TABLEAU 8 : CLASSIFICATION DES GRANDS FEUX

CLASSES	NOMBRE DE FEUX	POURCENTAGE (%)
1972 à 1977	10	19
1978 à 1983	20	37
1984 à 1989	16	29
1990 à 1994	8	15

Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1995.

Lorsqu'on regarde la carte 6, on constate que certaines régions demeurent plus affectées que d'autres par ces grands incendies de forêt. C'est le cas de la région de la Baie de James au Nord-Ouest du lac Mistassini. Un premier secteur est particulièrement touché, c'est celui incluant les feux compris dans les deux classes de 1978 à 1989. Ceux colorés artificiellement en orange clair datent surtout de l'année 1983 et se retrouvent surtout en forêt plus ouverte composée principalement de résineux situés dans la région écologique 12c et inclus dans le domaine de la pessière noire à mousses (voir l'annexe 2). Les grandes surfaces brûlées situées à l'extrême Nord-Ouest du territoire, faisant partie de la troisième classe et pouvant regrouper plus d'un feu (2 ou 3), datent surtout de l'année 1989. Plus d'un million d'hectares ont été brûlés dans ce secteur situé en milieu très ouvert, dont la surface est marécageuse en bonne partie (voir la classification) et composée de landes boisées, proches de la taïga québécoise. On ne retrouve que deux grands feux de la première classe parmi tous ces feux. Un d'eux, datant de l'année 1972, se situe en plein milieu des feux de 1989, et l'autre demeure plus au Sud en zone plus boisée, entre ceux de la seconde classe.

Un deuxième secteur est très affecté par des grands feux, dont les deux de 1993 et ceux de 1983 et 1986 situés à l'Ouest et au Sud-Ouest du lac Mistassini respectivement. Ces feux

font partie également de la même région et du même domaine climacique que les précédents. Par contre, ils sont localisés près de certains massifs de conifères denses intégrés à la forêt ouverte. Plusieurs feux (6), particulièrement de l'année 1986, sont localisés à l'est et à l'Ouest du réservoir Manicouagan. Situés en forêt de conifères denses, ces feux font partie des régions écologiques 11a et 9d, appartenant aux domaines climaciques de la pessière noire à sapin et mousses et à celui de la sapinière à épinette noire (Thibault, 1985).

Il faut aussi souligner la présence des trois grands feux dans le secteur de Baie-Comeau qui ont brûlé en 1991 plusieurs milliers d'hectares de forêt dense, composée de la sapinière à bouleau blanc et plus au Nord, de la pessière noire à sapin et mousses. Les régions 8g et 11a leur sont associées.

3.3.3 Feux non répertoriés

Le territoire du Québec méridional ne jouit pas partout de la même protection des forêts en ce qui concerne les incendies. Il existe un territoire à protection intensive qui se définit comme suit : " ensemble des forêts aménagées et des territoires qui les entourent (Ressource et industrie forestières, portrait statistique, 1994) ". Cette zone s'étend de l'extrême Sud du Québec jusqu'aux environs du parallèle 51 Nord. La protection intensive est un système qui prévoit l'adoption de mesures de prévention et la lutte systématique contre les feux de forêt et est gérée par la Société de Protection des Forêts contre le Feu (SOPFEU) du Québec. Or, la zone d'étude déborde de ce territoire de protection intensive, puisqu'elle s'étend jusqu'au parallèle 53 Nord. Ainsi, le territoire incluant plusieurs feux au-delà du parallèle 51 n'est pas protégé partout de la même façon.

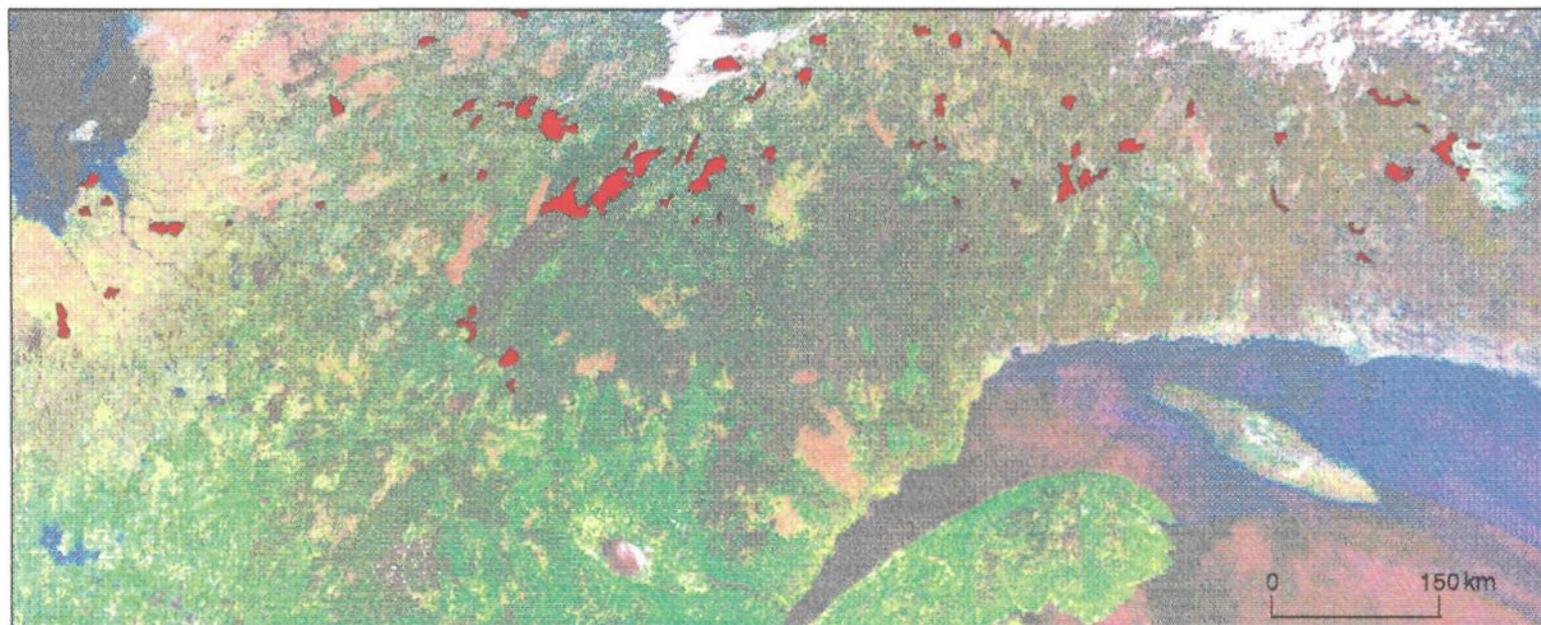
Nous avons réalisé, à partir de la même image satellitaire, une carte des feux de forêt exclus en partie des statistiques officielles (voir la carte 7). Certains feux (datant d'avant et d'après l'année 1972) ont été cartographiés à l'aide de la carte Synthèse forestière du Québec (1982) et de documents produits par la Société de développement de la Baie de James (1982). D'autres, avec des signatures spectrales similaires aux feux répertoriés, ont tout simplement été localisés à l'aide de l'image satellitaire. À noter que ces feux n'ont pas tous une superficie minimale de 15 000 hectares et forment, au Sud de ceux-ci, une ligne presque parfaite située entre les parallèles 51 et 52 Nord, passant juste au Nord du lac Mistassini et au centre du réservoir Manicouagan.

Il sont situés en général au Nord des régions de la Côte-Nord et du Saguenay-Lac-Saint-Jean, dans les domaines climatiques 11 et 12 surtout et parmi des forêts de résineux denses et ouverts. Sans être trop exhaustif, cinquante (50) d'entre eux ont été localisés, ce qui représente une grande superficie brûlée que nous ne pouvons pas encore déterminer avec précision.

3.3.4 Synthèse des feux répertoriés et non répertoriés

Afin de bien visualiser les feux de plus de 15 000 hectares et ceux non répertoriés, nous avons réalisé une carte synthèse regroupant tous ces feux. Il aurait été intéressant de cartographier l'ensemble des feux incluant ceux de moins de 15 000 hectares. Cependant, cet objectif est hors de notre propos. Toutefois, à la partie suivante (3.4), nous verrons la superficie occupée par l'ensemble des feux et leurs statistiques respectives.

FEUX ANCIENS OU NON RÉPERTORIÉS DU QUÉBEC BORÉAL



Sources: -Synthèse forestière du Québec, 1982
-Ministère des Ressources naturelles, Québec
-Image satellitaire NOAA du 4 septembre 1994,
captée au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

 Feux non répertoriés ou situés dans des zones à protection restreinte

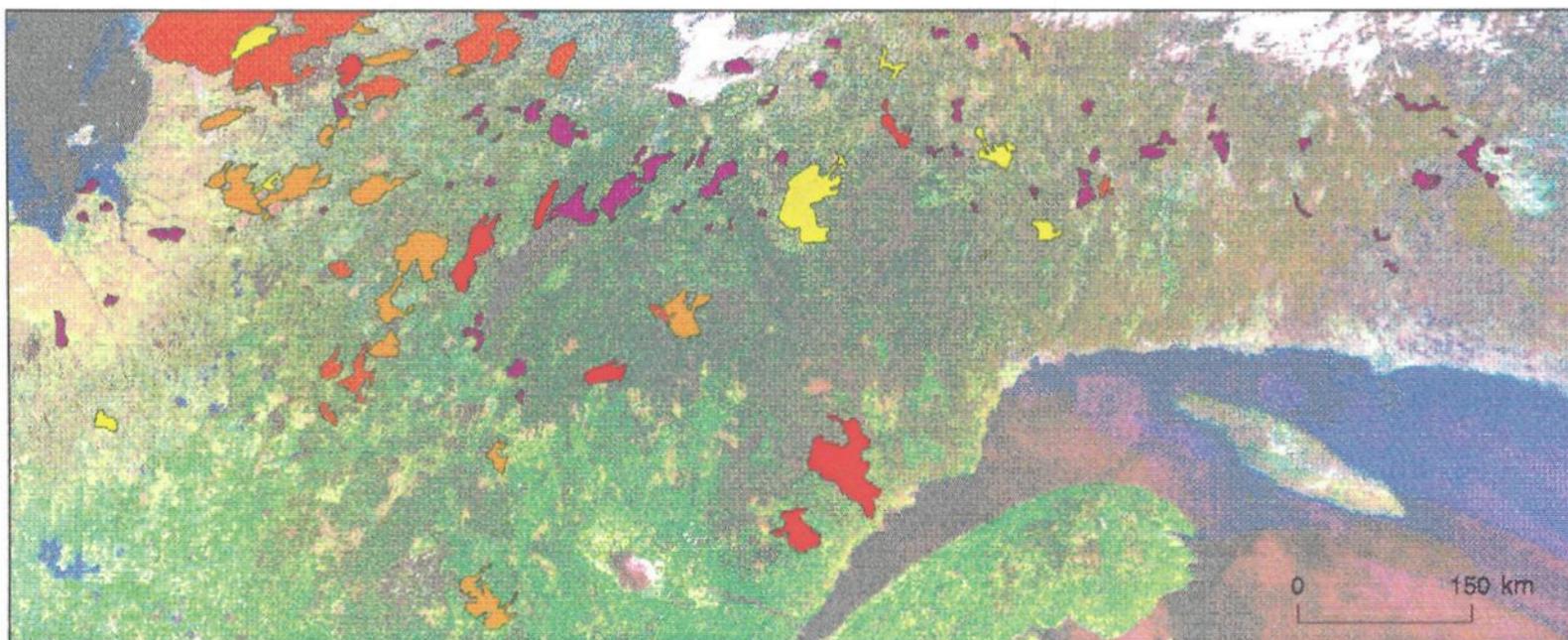
Ce qui ressort le plus de la présente carte (voir la carte 8), c'est qu'elle confirme encore une fois que la grande région située à l'Ouest et au Nord-Ouest du lac Mistassini, celle de la Baie de James, demeure la plus touchée par les grands incendies de forêt. Une forte concentration s'y retrouve. De plus, les feux non répertoriés montrent clairement la limite Nord de la zone de protection intensive, se terminant au Nord du lac Mistassini et au Nord de la région de la basse Côte-Nord.

3.4 Synthèse spatiale et temporelle des feux

Afin de bien comprendre l'importance qu'occupent les grands feux de forêt de 15 000 hectares et plus dans le Québec boréal, nous avons analysé les statistiques des feux plus petits en les comparant à celles des grands feux. Ainsi, la superficie et le nombre de ces derniers ont été examinés pour chacune des 23 années de l'échantillon de feux.

Comme nous mentionnions déjà, 54 grands feux de plus de 15 000 hectares furent répertoriés entre 1972 et 1994 dans la zone d'étude. De ce nombre, trois seulement sont d'origine humaine et la majorité demeure des feux de foudre. Le graphique 1 de la page 33 nous démontre clairement l'existence de trois années principales pour le nombre de feux, les années 1976 avec 8, 1983 avec 18 et 1989 avec 10 feux. Dans bien des cas, c'est-à-dire 12 années sur 23, nous n'avons noté aucun grand feu, tandis que nous en retrouvons 5 pour les années 1986 et 1991 (voir le tableau 9). En terme de superficie, nous remarquons également l'importance des années 1976, 1983 et 1989 avec 735 455, 725 588 et 1 148 750 d'hectares brûlés. L'année 1989 se distingue avec une moyenne de 114 875 hectares par feu (voir le graphique 2). Ces derniers étant principalement situés dans la région de la Baie de James (retour à la carte 6). Au total, les 54 grands feux ont brûlé 3 428 727 hectares sur une

SYNTHÈSE DES FEUX RÉPERTORIÉS ET NON RÉPERTORIÉS DU QUÉBEC BORÉAL



Sources: -Ministère des Ressources naturelles, Québec
 -Synthèse forestière du Québec, 1982
 -Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
 au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

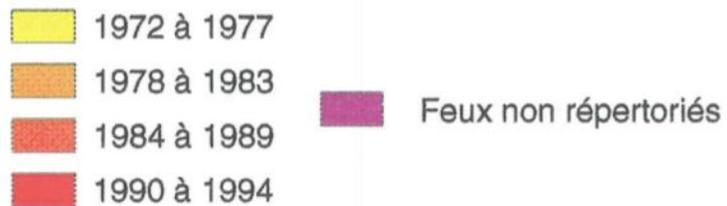


TABLEAU 9 : STATISTIQUES DE TOUS LES FEUX DE LA ZONE D'ÉTUDE

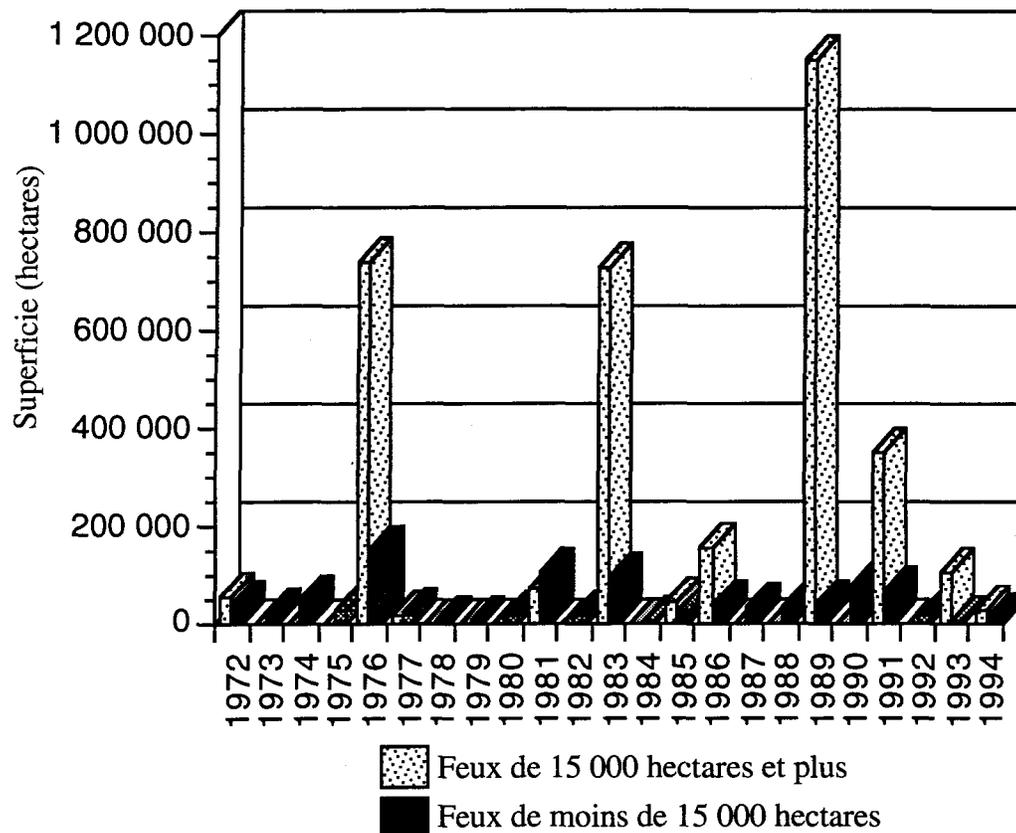
ANNÉES	GRANDS FEUX (Nombre)	PETITS FEUX (Nombre)	NOMBRE TOTAL	GRANDS FEUX Superficie	PETITS FEUX Superficie	Superficie Totale (hectares)
1972	1	658	659	56 680	37 937	94 617
1973	0	281	281	0	20 891	20 891
1974	0	381	381	0	46 968	46 968
1975	0	636	636	0	24 099	24 099
1976	8	538	546	735 455	146 651	882 106
1977	1	281	282	16 761	18 070	34 831
1978	0	369	369	0	3 815	3 815
1979	0	354	354	0	4 230	4 230
1980	0	453	453	0	16 875	16 875
1981	2	674	676	68 820	102 573	171 393
1982	0	460	460	0	14 831	14 831
1983	18	789	807	725 588	93 482	819 070
1984	0	291	291	0	2 630	2 630
1985	1	354	355	41 775	20 380	62 155
1986	5	341	346	153 023	39 626	192 649
1987	0	374	374	0	33 370	33 370
1988	0	478	478	0	29 173	29 173
1989	10	446	456	1 148 750	36 405	1 185 155
1990	0	430	430	0	76 672	76 672
1991	5	589	594	348 400	65 923	414 323
1992	0	249	249	0	17 188	17 188
1993	2	196	198	105 000	1 423	106 423
1994	1	240	241	28 475	11 862	40 337
TOTAL	54	9 862	9 916	3 428 727	865 074	4 293 801

Source: Ministère des Ressources naturelles, Québec

période de 23 années. Pour la même période, nous avons répertorié 9 862 feux inférieurs à 15 000 hectares totalisant 865 074 hectares brûlés (voir le graphique 3). En moyenne, 429 petits feux par année pour 433 hectares pour chacun d'eux. L'année 1983 contient le plus grand nombre de feux (789), ce qui correspond à la même année pour le nombre de grands feux. Toutefois, la superficie brûlée de l'année 1976 avec 146 651 hectares demeure la plus importante. Le graphique 5 nous indique aussi l'importance des années 1981, 1983, 1990 et 1991 pour la superficie brûlée.

GRAPHIQUE 2

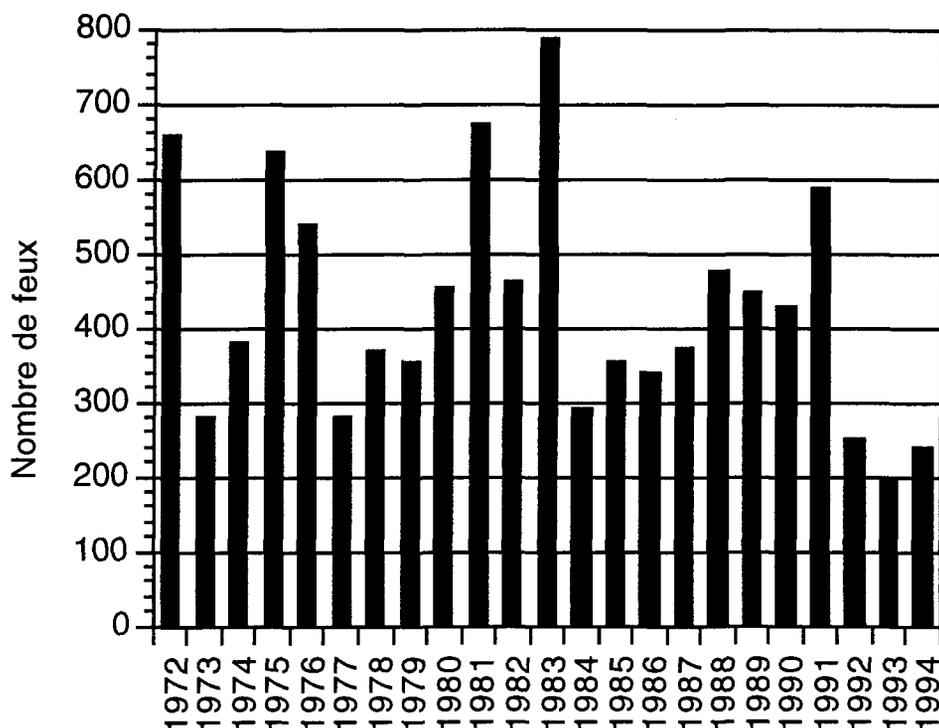
SUPERFICIE DES FEUX DE PLUS ET DE MOINS DE 15 000 HECTARES



Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

Nous avons également calculé la superficie et le nombre total de feux pour la même période de temps. On note surtout que la superficie totale s'associe à celle des grands feux tandis que le nombre total s'associe à celui des feux de moins de 15 000 hectares (voir le tableau 9). Plus de 4 millions d'hectares ont brûlé, ceci correspondant à 9 916 petits et grands feux dans le territoire à l'étude. À eux seuls, les 54 grands incendies de plus de 15 000 hectares ont brûlé près de 80% de la superficie totale brûlée avec seulement 0,5% de l'effectif total.

GRAPHIQUE 3
FEUX DE 15 000 HECTARES ET MOINS
1972 À 1994



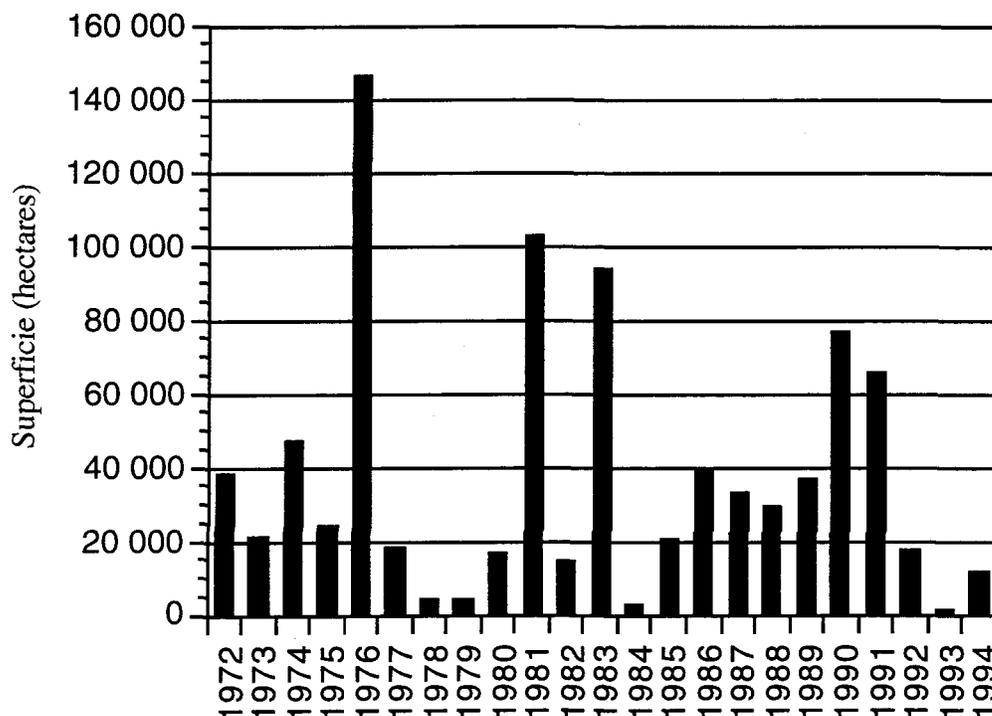
Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

Nous avons également utilisé les données sur les feux situés dans la zone de protection intensive afin de vérifier leurs relations avec celles du territoire d'étude (voir le tableau 10). Notons d'abord que les années présentant le plus grand nombre de feux ne correspondent pas

tout à fait à celles de la zone d'étude. En effet, on retrouve 1 963 feux pour l'année 1975, vient ensuite l'année 1983 avec 1 653 feux. C'est en 1994 que l'on a répertorié le moins de feux avec 463, ce qui n'était pas le cas pour le territoire étudié (198 au total en 1993). En tout, on dénote 22 688 feux couvrant 1 001 118 hectares brûlés. C'est 4 fois moins que la superficie brûlée du territoire à l'étude, mais plus du double en ce qui concerne le nombre de feux. La moyenne par feu est de 44 hectares, tandis que pour la zone d'étude, elle est de 433 hectares, c'est-à-dire 10 fois plus importante.

GRAPHIQUE 4

SUPERFICIE DES FEUX DE 15 000 HECTARES ET MOINS 1972 à 1994



Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

TABLEAU 10 : FEUX DE LA ZONE DE PROTECTION INTENSIVE

ANNÉES	NOMBRE DE FEUX	SUPERFICIE (Hectares)
1972	1 042	21 952
1973	506	3 032
1974	910	3 088
1975	1 963	17 110
1976	996	56 945
1977	1 321	14 177
1978	1 160	3 672
1979	615	3 200
1980	861	13 177
1981	1 114	2 480
1982	1 202	7 970
1983	1 653	238 903
1984	683	3 082
1985	885	2 697
1986	830	167 550
1987	959	20 934
1988	1 266	7 143
1989	1 064	6 497
1990	798	16 064
1991	1 156	378 893
1992	723	9 439
1993	518	984
1994	463	2 179
TOTAL	22 688	1 001 118

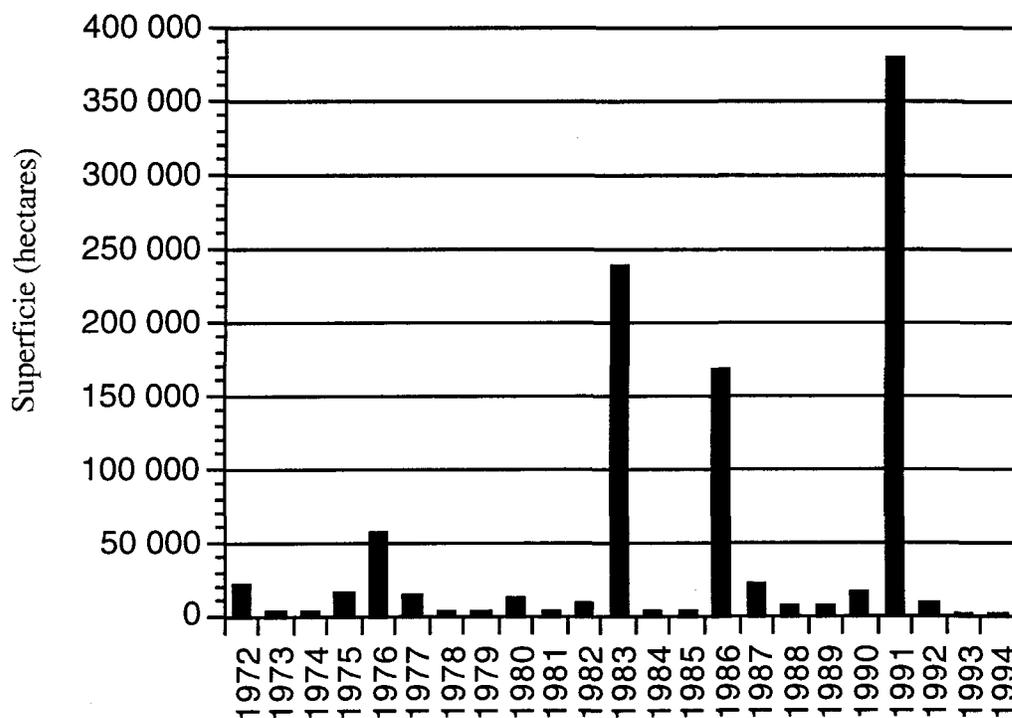
Sources: Ministère des Ressources naturelles du Québec

Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU)

Toutefois, il faut ajouter que ces dernières données n'incluent que partiellement celles de la région à l'étude puisque celle-ci couvre du 48^e au 53^e degré de latitude Nord et celle de la zone de protection intensive part de l'extrême Sud du Québec jusqu'aux alentours du 51^o degré de latitude Nord.

Le graphique 5 fait ressortir davantage la superficie brûlée des années 1983, 1986 et 1991. Respectivement, on retrouve 238 903, 167 550 et 378 893 hectares pour chacune d'entre elles. L'année 1991 est particulièrement importante puisqu'elle représente à elle seule plus du tiers de toute la superficie brûlée dans ce territoire à forte protection. Ceci s'explique surtout par la présence des grands feux situés dans la région de Baie-Comeau, couvrant la majorité de la superficie déjà indiquée. Signalons également l'importance de la superficie incendiée par les feux de foudre. En effet, de 1972 à 1993, les feux de foudre ne sont responsables que de 20% du nombre total mais comptent pour plus de 81% de toute la superficie brûlée dans la zone de protection intensive. (Ressource et industrie forestière; portrait statistique, 1984 et 1994).

GRAPHIQUE 5
SUPERFICIE DES FEUX DANS LA ZONE DE PROTECTION INTENSIVE
1972 À 1994



Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

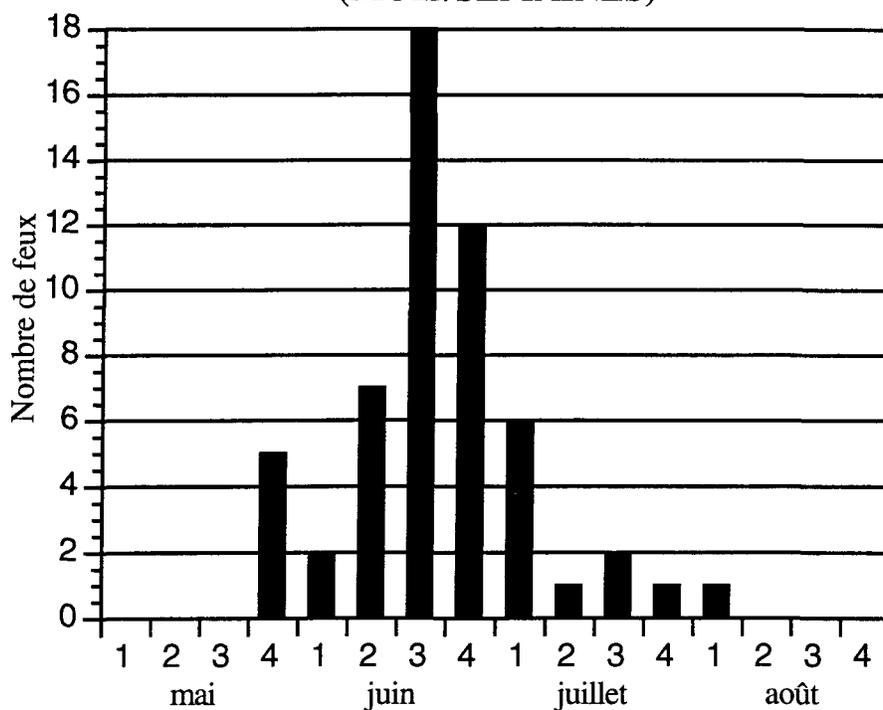
Ensuite, nous avons observé à quel moment se produisent les grands feux pour mieux cerner les périodes critiques de leur déclenchement. Tous ces grands incendies se sont produits dans les mois de mai, juin, juillet et août. Sans contredit, c'est le mois de juin qui en compte le plus grand nombre puisque 38 feux sur 54 ont débuté dans ce mois, c'est-à-dire 70% de tous les grands feux (voir le graphique 6). Dix d'entre eux se sont passés en juillet, cinq en mai et un en août. Pour plus de détails, nous avons décortiqué ces mois en semaines pour réaliser que 30 des 38 feux du mois de juin ont débuté à la troisième et quatrième semaine, soit 18 et 12 respectivement (voir le graphique 7). Les cinq feux du mois de mai se sont produits à la quatrième semaine et six des dix feux du mois de juillet à la première semaine. Le seul feu du mois d'août eut lieu à la première semaine. En résumé, la grande majorité d'entre eux se concentre entre la dernière semaine du mois de mai et la première du mois de juillet.

GRAPHIQUE 6
DÉBUT DES FEUX DE 15 000 HECTARES ET PLUS
1972 À 1994



Source: Ministère des Ressources naturelles du Québec

GRAPHIQUE 7
DÉBUT DES FEUX DE 15 000 HECTARES ET PLUS
(MOIS/SEMAINES)



3.5 Paramètres de géographie physique

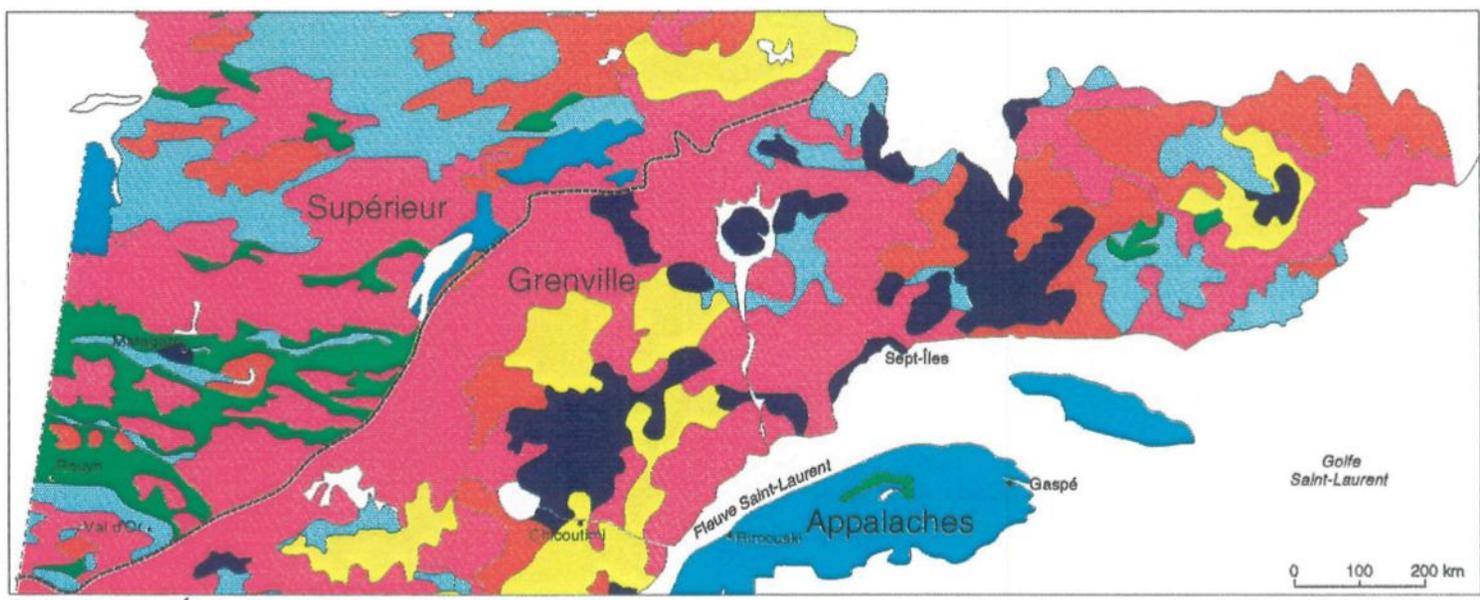
Dans le but de mieux décrire le territoire à l'étude et d'établir certaines corrélations avec la problématique des feux, nous retenons trois paramètres de géographie physique qui peuvent, dans une certaine mesure, nous aider à expliquer la répartition inégale des grands incendies de forêt en milieu boréal. À ce titre, les trois paramètres sont : la géologie, les dépôts de surface et le relief, incluant les pentes et l'altitude moyenne.

3.5.1 Géologie

Deux grandes divisions géologiques principales composent le territoire à l'étude. D'abord, il y a la partie est du Bouclier canadien incluant deux provinces structurales qui nous intéressent: celle du Supérieur qui occupe toute la partie Ouest (voir la carte 9), formant une ligne transversale partant au Sud de Val d'Or en passant par l'est du lac Mistassini jusqu'au Centre-Nord du territoire et celle de Grenville englobant toute la partie Nord du fleuve et de l'estuaire du Saint-Laurent. Notons pour l'instant que ces deux provinces font partie de l'ère la plus longue et la plus ancienne des temps géologiques et demeurent formées principalement par des roches du Précambrien (Landry et Mercier, 1984). Même si le secteur de la péninsule gaspésienne et de l'île d'Anticosti ne fait pas l'objet de la présente étude, nous soulignons que ce secteur fait partie de la division géologique des Appalaches et est formé majoritairement de roches plissées du Paléozoïque dont l'âge varie du Cambrien au Carbonifère. Il faut dire également que la partie Nord-est de la zone d'étude (associée au territoire du Labrador) est exclue de cette description, faute de données disponibles pour l'instant.

Précisément, la province du Supérieur provient essentiellement de la période géologique archéenne date de 2 500 millions d'années. Elle est surtout composée de roches volcaniques situées au Sud du 50° degré de latitude Nord, de roches granitiques et gneissiques au centre et de roches métasédimentaires (schiste, paragneiss etc.) au Nord de cette province. On retrouve aussi des intrusions felsiques et intermédiaires (granodiorite, tonalite, granite etc.) près des roches métasédimentaires et un groupement important de roches à caractère granulitique (gneiss granitique) au centre-Nord de cette formation. Trois principaux groupements de roches sédimentaires sont localisés d'abord au Sud de l'île Charlton

GÉOLOGIE DU QUÉBEC BORÉAL



Source: Centre d'Études sur les Ressources Minérales, UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

- | | |
|--|--|
|  Roches volcaniques (laves, tufs) |  Intrusions felsiques et intermédiaires |
|  Métasédiments |  Roches mafiques et ultramafiques |
|  Complexe gneissique |  Limite de province structurale |
|  Intrusions et gneiss charnockitiques | |

à la Baie de James (calcaire et shale), autour des lacs Mistassini et albanel (dolomie, grès, conglomérat) et près des Monts Otish, au Nord des lacs précédents (dolomie, shale, arkose). Enfin, les structures générales sont orientées est-Ouest.

La deuxième province structurale, celle de Grenville, occupe la plus grande partie du territoire à l'étude et se qualifie comme la plus jeune province tectonique du Bouclier, datant d'environ 955 millions d'années. Elle est principalement formée par un complexe gneissique (gneiss gris à quartz etc.) réparti un peu partout dans le territoire et par un grand complexe d'anarthosites (roches mafiques et ultramafiques). On y trouve des métasédiments (paragneiss, quartzite, amphibolites) au Sud-est du réservoir Manicouagan et surtout à l'est du territoire, dans la région de la Côte-Nord et des groupements de roches intrusives déformées accompagnées de gneiss charnockitiques localisés principalement au centre de la structure géologique.

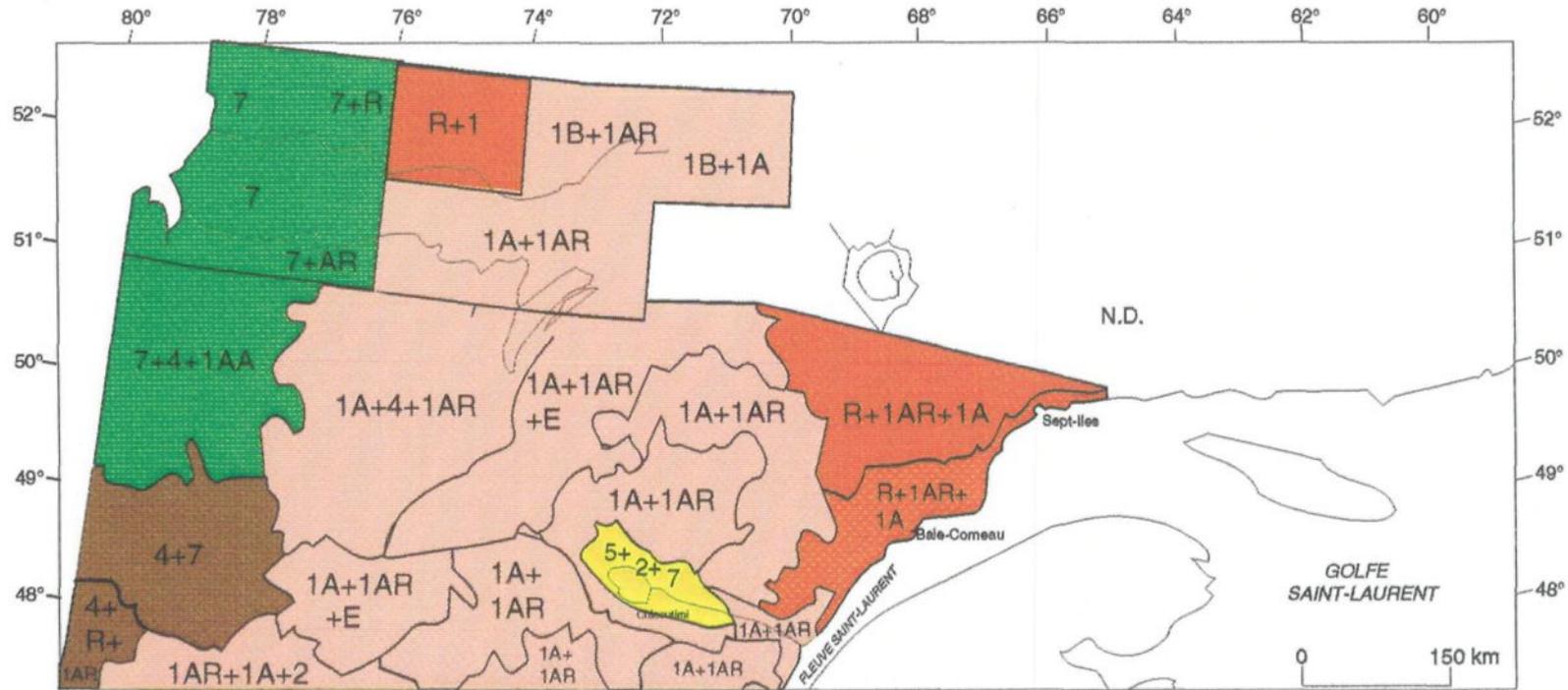
Pour ne dire que quelques mots sur la province structurale des Appalaches, notons qu'elle est majoritairement associée à des roches sédimentaires (shale, grès et calcaire) et volcaniques et que les structures ont une orientation Nord-est.

3.5.2 Dépôts de surface

Il faut mentionner que la partie Nord-est du territoire (voir la carte 10), correspondant à la région de la moyenne et haute Côte-Nord ainsi qu'au Nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean, ne sera pas incluse dans la présente description puisque les données n'étaient pas encore entièrement disponibles. Indiquons également que la région comprise entre les méridiens 70 et 80 Ouest et les parallèles 51 et 53 Nord a été décrite grâce aux travaux réalisés

DÉPÔTS DE SURFACE

DANS LES AIRES ÉCOPHYSIOGRAPHIQUES ET LES DISTRICTS ÉCOLOGIQUES DU QUÉBEC BORÉAL



Sources: -Ministère de Ressources naturelles, Québec
 -SEER, Environnement Canada

André Carrier, MRR, UQAC

- Sédiments organiques
- Sédiments argilo-marins
- Sédiments lacustres et fluviaux
- Till
- Roche en place

- 1A: Till épais
- 1AA: Till argileux
- 1B: Till aux formes glaciaires
- 1AR: Till mince
- 2: Sédiments fluvioglaciers
- 4: Sable fin, limon, argile

- 5: Dépôts marins
- 7: Dépôts organiques
- R: Roche en place
- E: Eau
- N.D.: Données non disponibles

par Michel Jurdant et Jean-Pierre Ducruc dans le cadre de la cartographie écologique du territoire de la Baie de James, pour le compte du ministère de l'Environnement du Canada. Tout le reste de la zone d'étude correspond aux aires écophysiographiques élaborées dernièrement par certains gens du ministère des Ressources naturelles du Québec.

La majorité du territoire est constituée de sédiments glaciaires situés principalement au centre. Ils sont composés en grande partie de till épais (1A=dépôt morainique indifférencié) et de till mince sur roc (1AR). Plus au Nord de ceux-ci, on retrouve des formes particulières telles qu'une moraine frontale ou interlobaire. Dans l'aire située au Sud-Ouest du lac Mistassini, on retrouve non seulement du till mais aussi des dépôts glaciolacustres sableux et argileux (4). Les aires à l'est et au Sud de celle-ci se caractérisent par une forte présence de milieux aquatiques avec respectivement 10% et 16% de leur surface. Notons aussi la présence d'importants épandages fluvioglaciaires (environ 14% de cette aire) surmontés de tourbières situées dans l'aire au Sud-Ouest du territoire d'étude (Unités et aires écophysiographiques: paysages régionaux du Québec méridional, MRN, Québec, 1995).

Le secteur à l'est de la Baie de James est majoritairement composé de sédiments organiques tels que des marécages et tourbières, surtout concentrés près de la dite baie. La présence de roc à nu et de till mince est à noter, plus à l'est toutefois. Juste au Sud de ce secteur, est localisée une aire caractérisée également par une vaste couverture de dépôts organiques qui occupe plus du tiers de cette superficie. Au pourtour de l'aire, on distingue des dépôts glaciolacustres surtout argileux avec la présence plus au Nord de till argileux.

Au Sud-Ouest du territoire, on retrouve des aires composées de dépôts lacustres et fluviatiles argileux recouvrant près de la moitié de la superficie correspondante, suivie au

Nord de dépôts organiques (tourbières) et plus au Sud par de la roche en place et de till mince. Il y a aussi trois secteurs où prédominent les affleurements rocheux. D'abord, au Sud du réservoir Manicouagan, on retrouve plus de 40% de roc à nu accompagné de till mince et de till épais, tandis que l'aire située juste au Sud de celle-ci se compose un peu plus du tiers en roc et présente une portion équivalente à celle de l'aire précédente en till épais et mince. Enfin, situé au Nord-Ouest du territoire à l'étude, un troisième secteur comprend une grande partie de roche en place accompagnée de sédiments glaciaires stratifiés ou partiellement stratifiés.

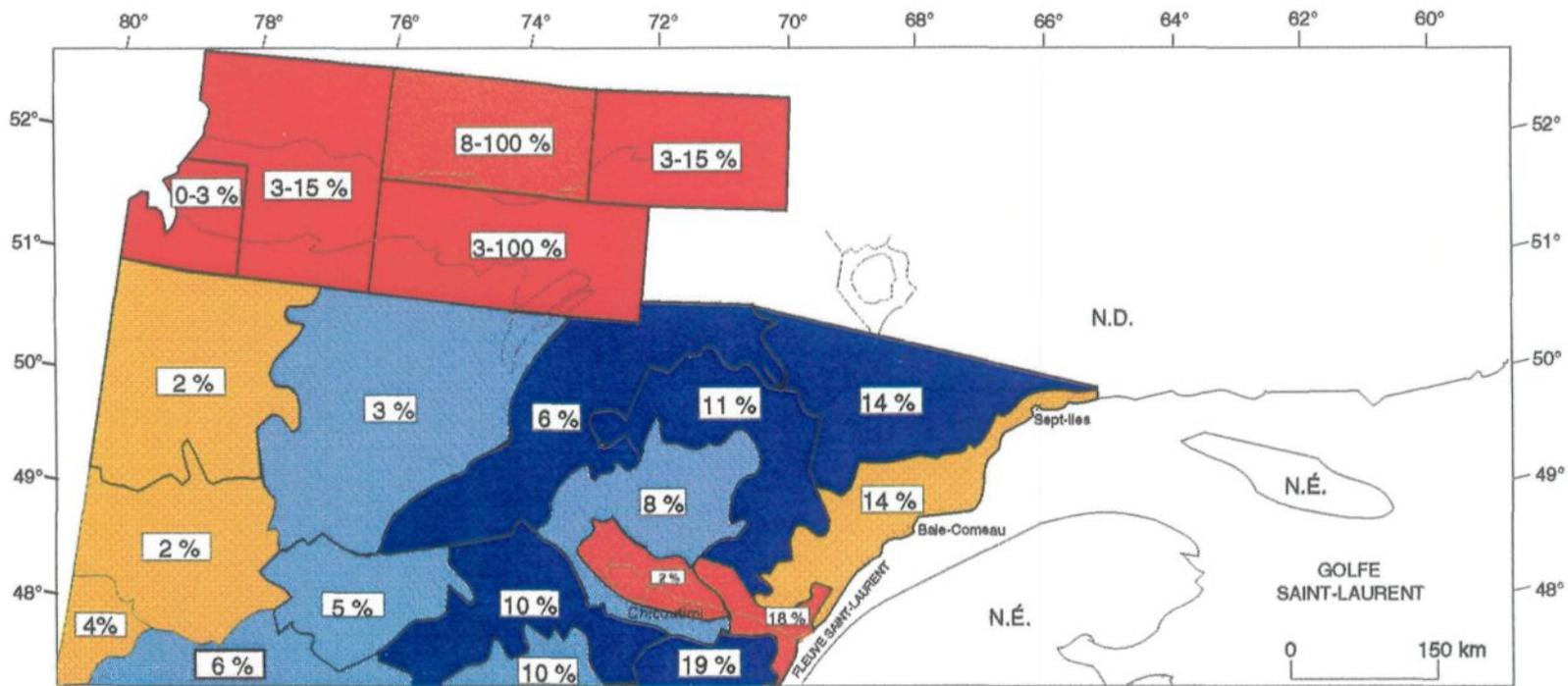
Dans la plaine du Saguenay et du lac Saint-Jean, on retrouve une prédominance de sédiments argilo-marins sur 40% de la superficie. Ils sont généralement argileux autour du lac et sableux au Saguenay. On note aussi de grands deltas fluvio-glaciaires accompagnés de dépôts tourbeux à l'embouchure des principales rivières.

3.5.3 Le relief

Nous ferons intervenir ici deux paramètres qui nous apparaissent importants pour l'étude des feux. Dans un premier temps, nous verrons sur la carte du relief la variation de

RELIEF

DANS LES AIRES ÉCOPHYSIOGRAPHIQUES ET LES DISTRICTS ÉCOLOGIQUES DU QUÉBEC BORÉAL



Sources: -Ministère de Ressources naturelles, Québec
-SEER, Environnement Canada

André Carrier, MRR, UQAC

ALTITUDE MOYENNE (mètres)		PENTE (%)	
■ 0 à 150	■ 351 à 450	3 %	Pente moyenne pour chaque zone
■ 151 à 250	■ 451 et plus	0 -15 %	Pente variable
■ 251 à 350	■ N.É. Territoire non étudié	N.D. :	Données non disponibles

l'altitude selon le même découpage géographique que la carte précédente. Ensuite, pour chacune des aires ou régions, il y aura présentation de la pente moyenne exprimée en pourcentage. Notons cependant que cette dernière variable sera exposée différemment pour les sous-régions du Nord-Ouest de la carte, appelées ici les régions de la Baie de James. Mentionnons de même la non-disponibilité des données pour les régions de la haute et moyenne Côte-Nord et du Nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

En ce qui concerne l'altitude moyenne, c'est la faible élévation de toute la sous région de la Baie de James et du Nord-est du lac Mistassini qui ressort le plus. L'altitude moyenne à cet endroit est comprise entre 0 et 150 mètres, ce qui diffère beaucoup du Saguenay-Lac-Saint-Jean et du Sud du réservoir Manicouagan. Ces régions présentent une altitude moyenne de plus de 451 mètres. L'augmentation graduelle de l'altitude d'Ouest en est caractérisée les aires situées au Sud de la Baie de James. En effet, les trois régions les plus à l'Ouest du territoire possèdent une altitude moyenne comprise entre 251 et 350 mètres et sont suivies à l'est par trois aires avec une altitude moyenne entre 351 et 450 mètres, pour finalement être suivies des régions à forte altitude. Les aires situées plus à l'est, correspondant aux régions de la haute Côte-Nord et au Saguenay-Lac-Saint-Jean, se caractérisent avec une altitude variant entre 151 et 350 mètres.

De façon plus détaillée, les régions de la Baie de James ont un relief variant de plat (0 à 5 mètres) à montueux ou accidenté (100 à 200 mètres) par endroit. Celle qui possède une pente variable de 0 à 3% demeure la plus faible en altitude (voir la carte). Elle est entourée par une région à relief surtout ondulé (5 à 30 mètres) avec des pentes pouvant atteindre 15% à certains endroits. La sous-région possédant une pente variant de 8 à 100% a un relief changeant de ondulé à moutonné (30 à 100 mètres). Celle située au Nord du lac Mistassini

possède un relief qui varie beaucoup partant de ondulé jusqu'à montagneux (surtout à l'est du même lac, près des monts Otish), ce qui implique aussi des pentes très variables comprises entre 3 et 100%. La sous-région située au Nord-Ouest du réservoir Manicouagan possède un relief plutôt ondulé avec des pentes oscillant entre 3 et 15% (Jurdant et Ducruc, 1980).

Les trois aires situées à l'Ouest ont un relief doux et ont la forme d'une plaine entremêlée de buttes et de coteaux. Elles sont marquées par des pentes très faibles de 0 à 3% pour plus de 80% de leur superficie. Ensuite, les trois régions à l'est de ces dernières se caractérisent par un relief également assez doux et peu ondulé mais avec des pentes légèrement plus accidentées jouant surtout entre 0 et 3%. L'aire située au Sud-est du lac Mistassini possède une altitude moyenne de 471 mètres et se distingue par un relief s'adoucissant d'est en Ouest formé de collines dans la partie est et de coteaux séparés par de grandes dépressions à l'Ouest. La pente moyenne est de 6%. Plus au Sud, on retrouve une aire marquée par une altitude moyenne de 486 mètres dont le relief est plus doux au Nord et composée de hautes collines au Sud. La distribution des pentes de cette aire demeure plus variée avec une moyenne de 10% en général.

Au centre du territoire d'étude, on note une augmentation de l'altitude vers le Nord, partant de la plaine du lac Saint-Jean jusqu'au Sud du réservoir Manicouagan. On parle ici d'un relief légèrement ondulé à un relief formé de collines et de hautes collines moyennement accidentées. Il en est de même pour les pentes moyennes qui augmentent aussi du Sud vers le Nord : 2%, 8%, 11% et 14%. Les régions longeant la rive Nord du fleuve Saint-Laurent se décrivent par un relief varié. L'aire entourant la rivière Saguenay est formée de monts et de hautes collines de forte amplitude altitudinale avec un relief marqué de failles aux parois abruptes et de vastes escarpements rocheux (Saucier et Robitaille, 1995). Elle est évidemment

constituée de pentes fortes avec 18% en moyenne. Le relief de l'aire juste au Nord de celle-ci s'accroît de la côte vers l'intérieur des terres et est formé de plaines dans la région est et de hautes collines et de monts dans la partie Ouest. Les pentes sont également élevées avec 14% de moyenne.

Enfin, précisons que les régions situées au bas de la zone d'étude, soit au Sud du Saguenay-Lac-Saint-Jean et en bordure des contreforts des Laurentides, se distinguent par un relief accidenté incluant les plus fortes pentes (19%) du territoire. On y retrouve des hautes collines et des monts marqués par de profondes vallées encaissées.

3.6 Paramètres climatiques

Il existe toute une panoplie de facteurs qui influencent la climatologie en général. À l'échelle planétaire, les différents climats résultent de la variation des conditions astronomiques (rayonnement solaire et mouvements de la Terre) et géographiques (localisation des continents, des océans, du relief, etc.). Ainsi, les climats du globe sont caractérisés par une organisation zonale des flux atmosphériques généraux et par la présence de certaines masses d'air principales qui sont toutefois influencées par certains facteurs géographiques de grande échelle (océans, chaînes de montagne, etc.). À l'échelle régionale, des facteurs particuliers (massifs montagneux, vallées, lacs, etc.) assurent la réalité et la particularité climatique des régions (Proulx *et al.*, 1987).

Dans les pages suivantes, nous verrons principalement les paramètres climatiques suivants : les températures et les précipitations moyennes sur le territoire à l'étude. Nous

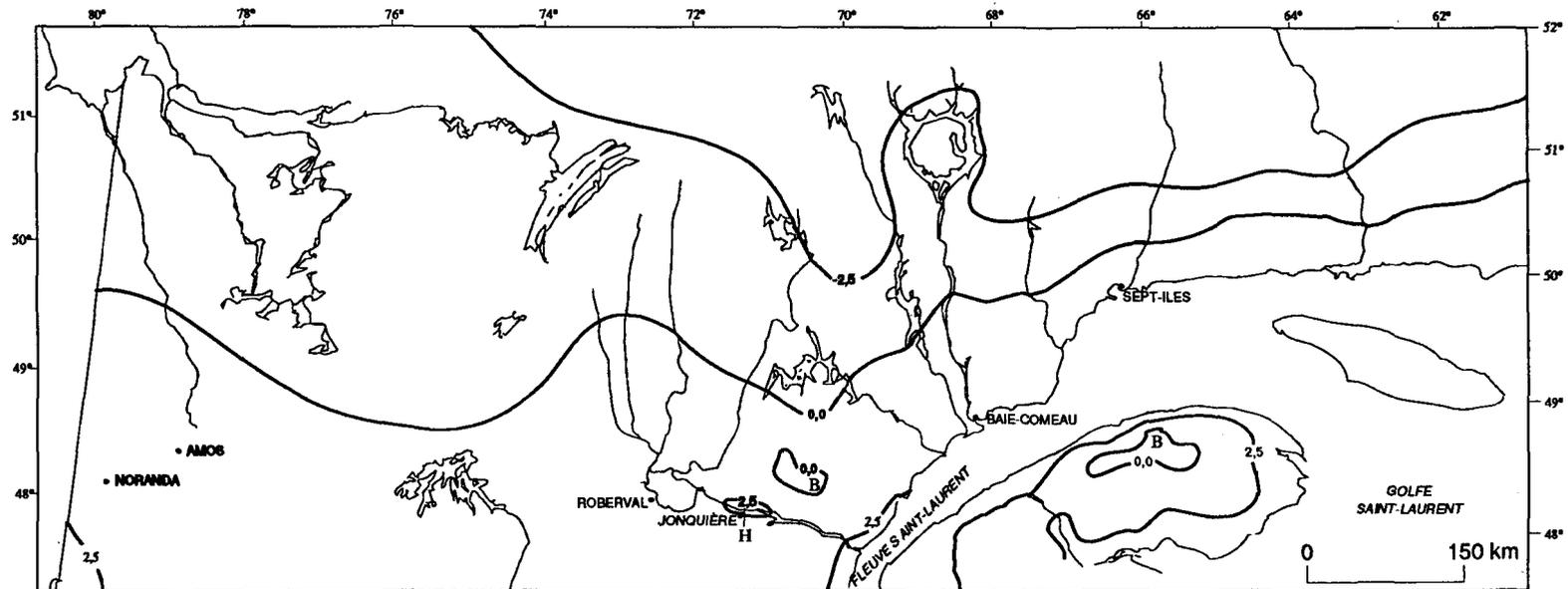
croyons qu'il existe une corrélation entre ces derniers paramètres et la localisation des feux précédemment cartographiés. Bien sûr, d'autres facteurs (direction et force du vent, humidité relative, etc.) peuvent influencer le niveau d'humidité de la matière première (le combustible forestier), facteurs que nous regarderons un peu plus loin.

Nous avons intégré des cartes climatiques dont les données proviennent du volume de "Climatologie du Québec Méridional" produit par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. À cela s'ajoutent des tableaux portant sur les années plus chaudes ou froides et plus humides ou sèches depuis 1972. Notons cependant que les données du ministère, qui ont servi de base pour la cartographie qui suit, sont les moyennes des années 1951 à 1980. Malgré cette période plus ou moins récente, elles couvrent une période importante de 30 années consécutives.

3.6.1 Températures moyennes annuelles

La carte de la température moyenne annuelle (voir la carte 12) nous donne une bonne idée de la répartition des températures au-dessus du territoire d'étude. On remarque deux isothermes principales qui caractérisent la zone d'étude. Elles correspondent à celles de 0 degré et -2,5 degré Celcius. L'isotherme 0 degré oscille entre les parallèles 49 (plus à l'Ouest) et 51 Nord (à l'est). À partir d'un lieu donné, situé au Sud du réservoir Pipmuacan, la même isotherme monte en latitude suivant de façon continue la rive Nord de l'estuaire du Saint-Laurent jusqu'au Sud du 51° degré de latitude Nord. Au Sud de cette ligne, qui correspond

TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES DU QUÉBEC BORÉAL (1951-1980)



Source: Environnement et Faune, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

$\overline{2,5^{\circ}\text{C}}$: Intervalle des isothermes

B : Températures plus basses dans la zone

H : Températures plus hautes dans la zone

grossièrement au 49° degré de latitude Nord, varient des températures comprises entre 0 et 2,5 degrés Celcius.

Toutefois, on retrouve certaines zones où se précise davantage la température moyenne. C'est le cas d'un secteur correspondant à la région urbaine de Chicoutimi-Jonquière avec une température plus haute de 2,5 degrés et juste au Nord de celui-ci, un autre secteur mais avec une température inférieure à 0 degré Celcius, associé au territoire des Monts-Valin. L'isotherme de moins 2,5 degrés Celcius débute à l'Ouest au 75e méridien, passe par le Nord des lacs Mistassini et Manouane et longe la rive Nord du réservoir Manicouagan, pour finalement se terminer entre les parallèles 51 et 52 Nord. Au Nord de cette isotherme se retrouvent des températures moyennes inférieures à -2,5 degrés.

Précisément, on remarque que la région comprise entre le Nord de l'Abitibi et de la Baie de James possède une température moyenne annuelle entre 0 et -2,5 degrés Celcius et que l'espace compris entre ces deux isothermes couvre plus de territoire à l'Ouest comparativement à l'est de la zone d'étude, surtout dans la région de la Côte-Nord. Ces deux isothermes sont plus rapprochées à l'est qu'à l'Ouest. Il y a aussi deux autres secteurs marqués par une moyenne de température supérieure à 2,5 degrés Celcius, dont un est situé au Sud-Ouest de l'Abitibi et un autre à l'embouchure de la rivière Saguenay. On remarque également qu'il fait plus froid en moyenne dans le territoire localisé au Nord de la région de la Côte-Nord comparativement à la même latitude au Nord-Ouest de la zone d'étude.

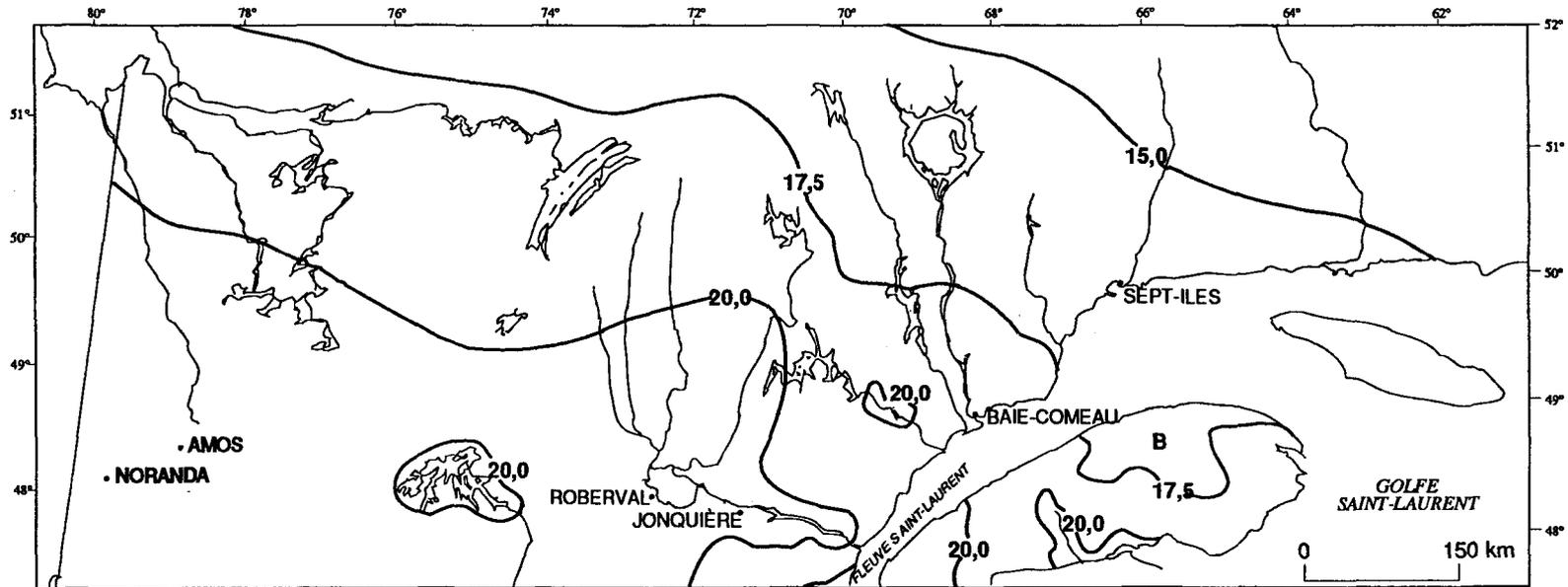
3.6.2 Températures maximales moyennes en juin

Notons ici que nous avons tenu à cartographier les températures moyennes pour le mois de juin puisque c'est pendant ce mois que se produisent la majorité des grands feux de forêt de plus de 15 000 hectares (70% d'entre-eux).

Situées sur la rive Nord du fleuve Saint-Laurent (voir la carte 13), les trois isothermes plus ou moins rectilignes de 15, 17,5 et 20 degrés Celcius montrent clairement des températures moyennes supérieures pour le mois de juin à l'Ouest comparativement à l'est de la région d'étude, soit pour les mêmes latitudes. L'isotherme de 20 degrés remonte à l'ouest des parallèles 50 et 51 Nord, ce qui n'est pas le cas à l'est puisqu'il redescend rapidement vers le Sud de la région de la Côte-Nord à la latitude du réservoir Pipmuacan. Il existe un seul secteur avec des températures moyennes inférieures à 15 degrés, soit celui situé en moyenne et basse Côte-Nord. À partir du centre de la carte vers l'Ouest, on retrouve des températures moyennes supérieures à 20 degrés Celcius, couvrant ainsi une bonne partie du territoire à l'étude.

De plus, il faut remarquer deux zones spécifiques où l'on note des températures différentes de leur environnement : la première se situe au pourtour du réservoir Gouin, à l'Ouest du lac Saint-Jean. Les températures y sont plus fraîches et sont probablement influencées par la masse d'eau importante que présente ce grand réservoir. Ensuite, la deuxième zone qui nous intéresse le plus est située au Sud-est du réservoir Pipmuacan où l'on retrouve des températures supérieures à 20 degrés Celcius. C'est un secteur plus chaud dans ce cas-ci puisqu'il est au centre des isothermes 17,5 et 20 degrés. Ceci est

TEMPÉRATURES MOYENNES MAXIMALES EN JUIN DU QUÉBEC BORÉAL (1951-1980)



Source: Environnement et Faune, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

2,5°C : Intervalle des isothermes

B : Températures plus basses dans la zone

particulièrement intéressant car il correspond presque entièrement à la localisation du grand feu de Baie-Comeau survenu en 1991.

3.6.3 Moyennes des précipitations totales annuelles

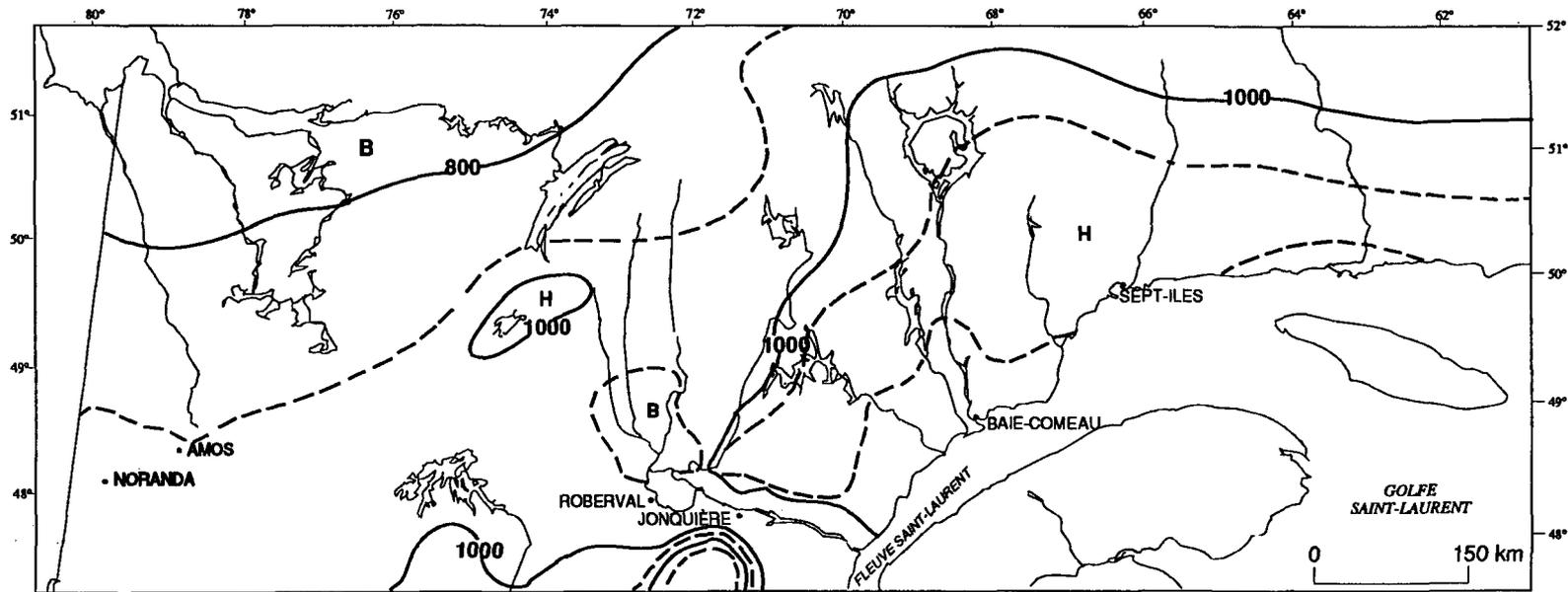
La carte 14 de la page suivante, nous indique qu'il y a une augmentation des précipitations totales d'Ouest en est dans le territoire étudié. Le secteur marqué par les plus faibles précipitations correspond surtout à celui de la Baie de James, mais aussi à partir du Nord de l'Abitibi jusqu'au Nord-est du lac Mistassini. On retrouve moins de 900 mm dans cette dernière partie et moins de 800 mm à la Baie de James. Le secteur est, associé à la Côte-Nord, demeure plus arrosé avec des précipitations comprises entre 900 et 1 200 mm annuellement. Ensuite, l'endroit le plus arrosé de ce même territoire se retrouve au Sud de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, correspondant au contrefort et à la réserve faunique des Laurentides.

Deux zones particulières sont à remarquer, celle située au Sud du lac Mistassini avec des précipitations supérieures à 1 000 mm et celle localisée au Nord du lac Saint-Jean avec, cette fois-ci, des précipitations inférieures à 900 mm.

3.6.4 Moyennes des précipitations totales en juin

La carte 15 correspondant à ce sous-chapitre démontre une répartition des précipitations qui ressemble beaucoup à la carte précédente puisque certaines régions se caractérisent de la même façon. En effet, la Baie de James est une des deux régions qui reçoit le

MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS TOTALES ANNUELLES DU QUÉBEC BORÉAL (1951-1980)



Source: Environnement et Faune, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

Intervalle des isohyètes: ---100 mm ———200 mm

B : Précipitations moins importantes dans la zone

H : Précipitations plus importantes dans la zone

moins de précipitations. Moins de 75 mm de pluie tombe dans ce secteur. Mais en général, au Sud de l'isohyète de 75mm, cette zone reçoit entre 75 et 100 mm de pluie. Remarquons que les isohyètes de 87,5 mm et de 100 mm correspondent grossièrement à celle de 900 mm de la carte précédente. Une deuxième région, plus petite cette fois, correspondant au pourtour de la ville de Baie-Comeau, accumule également moins de 75 mm de précipitations pour le mois de juin.

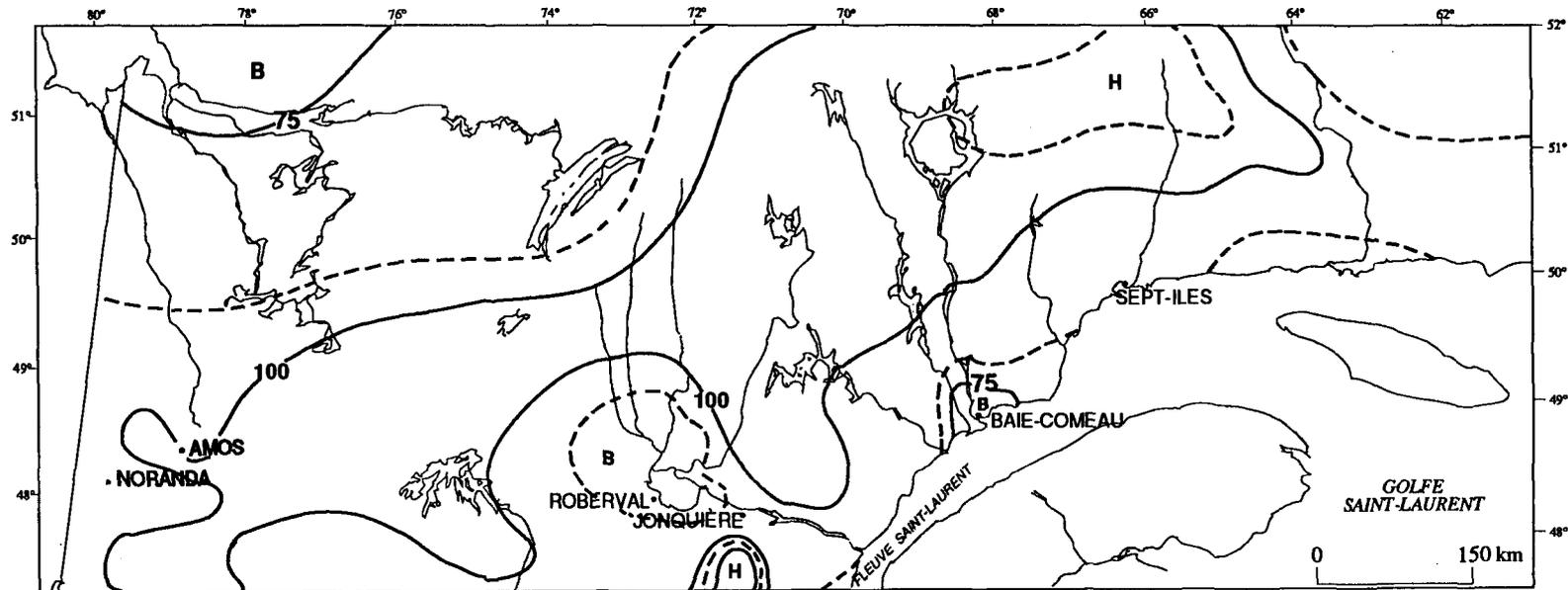
Le centre du territoire, comme la région de la Côte-Nord, reçoit entre 87,5 et 100 mm de pluie. Les deux secteurs les plus arrosés sont, d'abord celui situé au Nord-est du réservoir Manicouagan avec plus de 112,5 mm de pluie et celui correspondant au contrefort des Laurentides avec plus de 125 mm de pluie, demeurant ainsi le plus arrosé du territoire à l'étude pour ce même mois.

3.6.5 Moyennes des précipitations nivales annuelles

Nous avons retenu les statistiques suivantes car l'épaisseur du couvert nival joue un rôle déterminant sur la quantité d'eau de surface retrouvée au printemps, période importante pour le déclenchement des feux de forêt.

Généralement, l'Ouest du territoire reçoit moins de neige comparativement à l'est, ce qui coïncide avec les deux cartes précédentes. Il tombe moins de 250 mm de neige dans le Nord de l'Abitibi et à la Baie de James et de 200 à 400 mm pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. On retrouve entre 300 et 450 mm de neige dans la grande région de la Côte-Nord. Une petite zone se distingue parmi d'autres, soit celle située au Sud-est du réservoir Pipmuacan avec des précipitations inférieures à 300 mm. De plus, elle correspond

MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS TOTALES EN JUIN DU QUÉBEC BORÉAL (1951-1980)



Source: Environnement et Faune, Québec

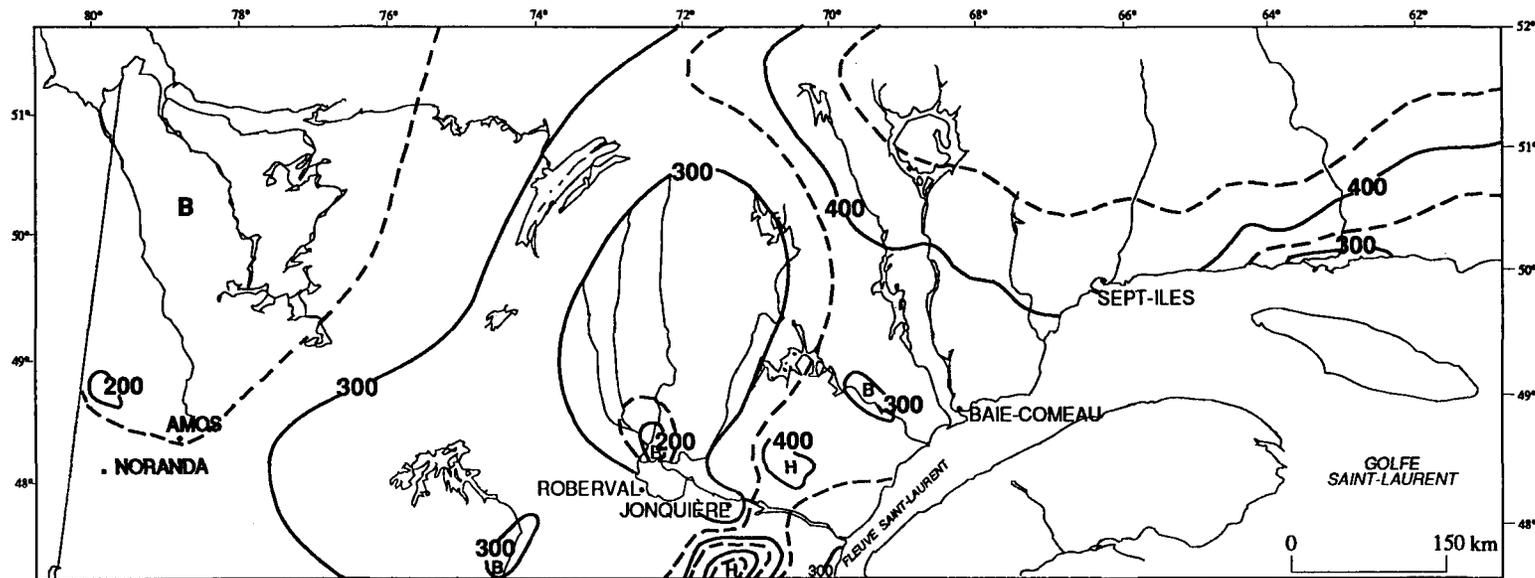
André Carrier, MRR, UQAC

Intervalle des isohyètes : ---12,5 mm — 25 mm

B : Précipitations moins importantes dans la zone

H : Précipitations plus importantes dans la zone

MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS NIVALES ANNUELLES DU QUÉBEC BORÉAL (1951-1980)



Source: Environnement et Faune, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

Intervalle des isohyètes : - - - 50 cm — 100 cm

B : Précipitations moins importantes dans la zone

H : Précipitations plus importantes dans la zone

curieusement à l'emplacement du grand feu de Baie-Comeau survenu en 1991. Une autre zone associée aussi avec moins de 300 mm se situe au Sud-est du réservoir Gouin. Le secteur étant le plus arrosé est celui, encore une fois, qui correspond au contrefort des Laurentides avec plus de 550 mm de neige annuellement. Celui le moins arrosé se retrouve juste au Nord du lac Saint-Jean avec moins de 200 mm de précipitations nivales.

Ce que l'on remarque beaucoup sur les cartes climatiques qui précèdent, c'est qu'il demeure possible d'associer les secteurs les plus arrosés à des régions montagneuses et constitués de hautes collines, telles que par exemples celles de la réserve faunique des Laurentides et des Monts-Valin. D'autres moins arrosés peuvent être associés à des vallées importantes ou à des régions caractérisées par de faibles altitudes comme celle de la Baie de James.

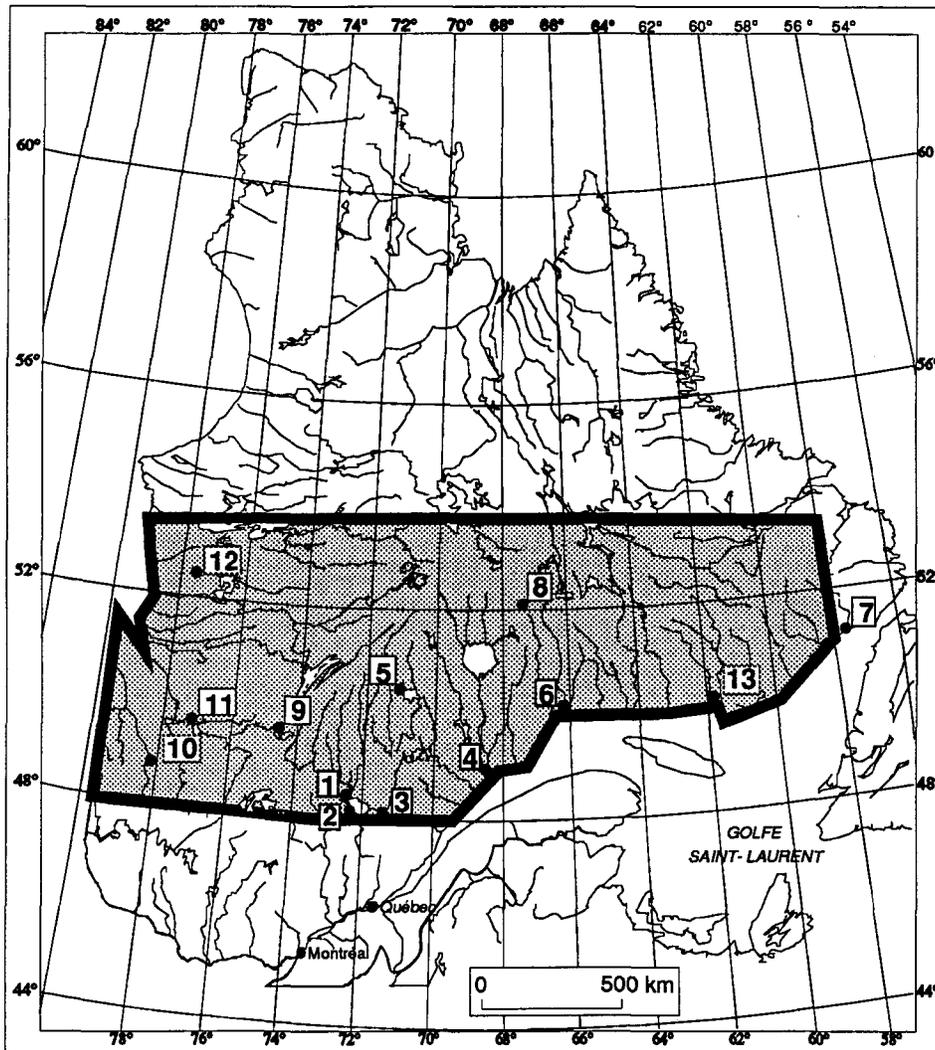
3.6.6 Années les plus chaudes et les plus froides

Dans le but de vérifier des corrélations potentielles entre le nombre de feux survenus dans le territoire de recherche et les années les plus chaudes ou froides, nous avons dressé, à partir de 13 stations météorologiques¹ réparties sur une bonne partie du territoire, la liste des températures et des précipitations moyennes annuelles (pour le sous-chapitre suivant) pour ce même territoire.

1- Nous n'avons retenu que ces 13 stations (voir la carte de localisation à la page suivante) car elles étaient les seules à présenter des statistiques complètes pour la majorité des années de la période d'échantillons de feux.

Carte 17

LOCALISATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES



Sources: Laboratoire de géographie de l'UQAC
Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec

André Carrier, MRR, UQAC

- | | | |
|------------------|-----------------|-----------------------|
| 1- Albanel | 6- Sept-Îles | 10- Amos |
| 2- Lac-Bouchette | 7- Blanc-Sablon | 11- Matagami |
| 3- Bagotville | 8- Shefferville | 12- Tête-à-la-Baleine |
| 4- Baie-Comeau | 9- Chapais | 13- Natashquan |
| 5- Bonnard | | |

Même si les données ne sont que partielles (voir le tableau 11 à la page suivante), l'année 1981 ressort comme la plus chaude avec huit stations sur treize présentant le maximum de température de 1972 à 1990. En plus, pour deux autres stations (Albanel et Amos), cette même année vient en deuxième place. Les données n'étaient pas disponibles pour trois autres stations. En ce qui concerne l'année la plus froide, cela demeure beaucoup plus apparent puisque l'année 1972 est la plus froide 12 fois sur 13, les données n'étant pas disponibles pour la treizième station (Matagami).

3.6.7 Années les plus humides et les plus sèches

À partir des mêmes statistiques (retour au tableau 10), nous réalisons que les précipitations les plus élevées des treize stations sont réparties sur huit années, ne mettant pas en évidence une année plus qu'une autre. Ainsi, l'année 1983 se distingue avec seulement trois maxima, suivies des années 1973, 1976 et 1979 avec deux. Toutefois, en ce qui concerne les années les plus sèches, nous nous apercevons que l'année 1987 semble avoir été moins arrosée que les autres puisque l'on y retrouve cinq maxima sur une possibilité de treize. Suivent ensuite les années 1972 et 1985 avec trois et 1977 et 1978 avec une seulement.

TABLEAU 11 : TEMPÉRATURES (T°C) ET PRÉCIPITATIONS MOYENNES (mm)
ANNUELLES DES 13 STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES*

Stations	Albanel		Lac Bou- chette		Bagotville		Baie- Comeau		Bonnard		Sept-Îles		Blanc- Sablon	
Années	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.
1972	0,1	796	-0,4	1 060	0,7	1 100	-0,2	995	-4,2	701	-1,3	1377	-2,0	1 066
1973	2,7	948	2,3	1 176	3,0	1 149	2,0	1 249	-1,0	1 090	1,4	1 281	0,9	996
1974	0,8	1 090	0,3	1 095	1,3	981	0,6	1 026	-3,1	859	-0,3	1 238	-0,8	1 242
1975	2,0	863	---	1 038	2,6	1 010	1,5	832	---	---	0,6	1 015	-0,1	1 221
1976	0,7	947	0,5	1 231	1,2	1 097	0,6	1 184	---	---	0,1	1 256	-0,2	1 133
1977	4,1	684	1,9	889	1,7	820	1,9	1 145	-1,3	988	1,7	1 024	1,3	973
1978	0,8	892	0,6	1 097	1,5	905	1,0	888	---	---	0,5	879	0,2	1 061
1979	2,3	1 063	2,1	998	3,1	863	2,7	1 150	-0,8	1 112	2,3	1 287	---	---
1980	1,1	953	---	---	1,5	932	1,4	1 102	-2,3	872	1,0	1 331	---	---
1981	3,3	863	3,0	986	3,5	961	3,0	1 211	0	867	2,6	1 282	---	---
1982	1,2	783	---	---	1,7	1 002	0,8	1 118	-2,5	959	-0,2	1 160	1,9	1 198
1983	2,3	1 011	---	---	3,1	1 094	2,0	1 266	-1,0	1 117	1,3	1 315	---	---
1984	1,9	810	2,0	978	2,6	871	1,3	884	-1,3	895	0,8	981	0	1 189
1985	1,0	889	0,8	972	1,6	908	1,0	873	-2,6	926	0,7	970	0	942
1986	1,4	885	---	---	1,7	1 035	0,7	1 125	-2,3	878	0,1	998	-0,2	1 039
1987	2,8	645	2,2	824	3,0	884	2,3	801	-0,7	972	1,8	861	1,6	978
1988	2,0	943	1,8	1 186	2,4	931	1,5	1 115	-1,0	1 019	1,1	1 156	0,7	1 130
1989	0,9	685	0,9	1 027	1,6	878	0,8	819	-2,4	805	0,3	1 013	-0,2	1 178
1990	2,3	871	2,3	1 019	2,9	1 002	1,5	1 081	-1,3	1 102	0,4	1 090	-0,8	1 311

Stations	Sheffer- ville		Chapais		Amos		Matagami		Tête-à-la- Baleine		Natashquan	
Années	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.	Temp.	Préc.
1972	-7,8	633	-1,7	700	-0,3	702	---	---	-1,3	1 201	-1,2	1 241
1973	-3,5	789	0,9	1 104	---	---	---	---	1,6	---	1,5	1 111
1974	-6,1	717	---	---	0,2	939	-2,0	986	-0,3	1 027	-0,5	1 131
1975	-5,4	928	---	---	1,6	827	-0,1	991	---	---	0,7	1 151
1976	-3,8	938	---	---	-0,2	961	-1,7	898	0,1	1 198	0,5	1 423
1977	-5,6	830	0,6	865	1,9	792	---	---	2,0	---	1,6	990
1978	---	---	---	---	0	876	0,1	735	0,6	1 184	0,4	1 022
1979	---	---	0,3	1 057	1,0	1 230	-2,0	944	2,0	1 283	2,6	1 250
1980	---	---	-0,8	888	0,4	978	-1,4	---	1,1	---	1,3	1 310
1981	-2,7	890	---	---	2,6	914	---	---	3,1	1 175	3,2	1 315
1982	-5,8	962	-0,6	1 019	1,0	905	-0,9	963	0	1 249	0,2	1 232
1983	-4,0	1 108	0,5	945	1,9	906	-0,3	957	1,8	1 258	1,7	1 337
1984	-4,9	769	0,4	809	2,0	874	0,2	758	0,7	1 137	0,8	1 086
1985	-4,8	558	-0,9	869	0,7	844	-1,6	945	0,9	965	0,8	742
1986	-5,7	798	-0,6	992	1,1	972	-0,7	880	0,6	996	0,4	874
1987	-4,1	858	1,1	819	3,0	934	1,0	874	2,2	995	1,9	1 055
1988	-5,4	708	-0,1	1 054	1,3	1 164	-0,7	1 183	1,4	1 101	-1,3	1 088
1989	-5,7	846	-1,1	1 006	0,2	1 102	-1,9	1045	0,6	1 246	0,5	1 120
1990	-6,3	901	0	1 098	1,8	1 061	-0,2	1032	0,1	1 036	0,3	1 259

Source: ministère de l'Environnement du Québec, 1987

*Les chiffres en caractères gras correspondent aux maxima et minima

3.6.8 Fréquence de la foudre

La foudre est un phénomène naturel qui se définit comme suit : c'est une décharge rapide et massive de l'électricité atmosphérique par les nuages au cours d'un orage (Kourtz et Todd, 1993). On distingue quatre types de décharges : entre les nuages, des nuages à l'air, à l'intérieur des nuages et du nuage au sol. C'est à ces dernières que nous ferons référence car ce sont elles qui produisent les feux de forêt.

Sans trop détailler, nous pouvons dire que les décharges électriques sont qualifiées de négatives ou de positives et que chacune d'elles comporte plusieurs caractéristiques. Il existe des éclairs à courant continu qui demeurent la source des principaux incendies de forêt. Plusieurs facteurs, tels que la latitude, le moment de la journée et les variations saisonnières, sont importants dans l'estimation de la décharge de courants continus (Kourtz et Todd, 1993). Ainsi, on remarque des différences d'intensité des orages qui ne sont pas localisés au même endroit. Baughman et Schmid (1977) ont constaté des orages moins intenses en Alaska que dans l'Ouest du Montana et qu'ils produisaient moins d'éclairs à courant continu. De plus, Orville (1990) a démontré que les caractéristiques des éclairs variaient aussi selon la latitude. Plus près de nous, certains auteurs (Flannigan et Wotton, 1991) ont remarqué des variations saisonnières dans la foudre observée dans le Nord-Ouest de l'Ontario. La manifestation de la foudre augmente en juin, culmine en juillet et baisse en août et plus rapidement encore en septembre. Précisément, 9% de leurs observations, datant du 15 avril au 21 septembre 1988, provenaient du mois de mai, 23% en juin, 33% en juillet, 26% en août et 9% en septembre (Kourtz et Todd, 1993). En plus, selon une étude portant aussi sur la foudre pendant la saison estivale de 1990 en Ontario, l'activité de la foudre montre une très

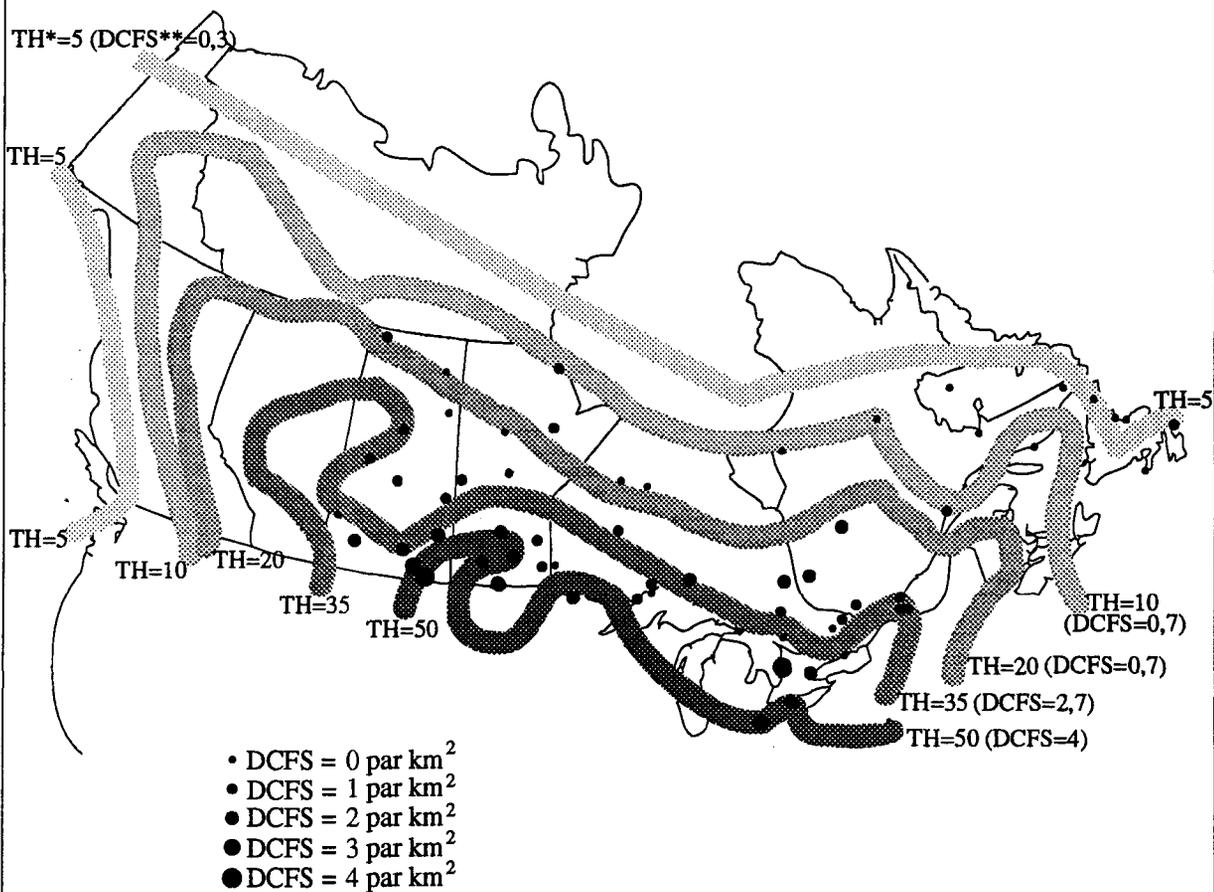
grande variation d'une journée à l'autre, et présente également un cycle journalier variant d'une heure à l'autre avec des minima en avant-midi et des maxima en après-midi (Association canadienne de l'électricité, 1992).

Sur le plan canadien, on remarque également des différences majeures pour la répartition de la foudre. La carte 18 montre les niveaux kérauniques (climatologie des heures de tonnerre et des coups de foudre au sol) sur l'ensemble du pays. De façon générale, les régions du Pacifique et de l'Atlantique ont une faible activité de la foudre comparativement au Sud de la Saskatchewan, du Manitoba et de l'Ontario. En effet, dans ces provinces, on y retrouve entre 35 et 50 heures de tonnerre par année contre 5 heures pour les Maritimes et la Colombie-Britannique. Sur cette même carte, une deuxième variable (celle de la densité des coups de foudre au sol) démontre que la foudre touche le sol très souvent dans les quatre provinces du centre du pays, particulièrement en Saskatchewan et au Manitoba.

Pour le Québec, il semble que le Sud de cette province demeure plus atteint par le nombre d'heures de tonnerre par an (entre 20 et 35) et par la densité des coups de foudre au sol. Pour les latitudes qui nous intéressent le plus, c'est-à-dire le territoire compris entre les parallèles 48 et 53 Nord, le nombre d'heures de tonnerre varie entre 10 et 20 et la densité des coups de foudre au sol est approximativement de 0,7 comparativement à 2,7 au Sud de la dite province. Toutefois, on remarque que les régions plus à l'Est (Côte-Nord et Gaspésie) présentent des résultats moindres (pour les mêmes latitudes environ) à ceux des régions de l'Abitibi et du Nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Carte 18

NIVEAUX KÉRAUNIQUES HORAIRES SUR UNE MOYENNE ANNUELLE AU CANADA DE 1953 À 1983



* TH = Tonnerre (heure/an)

** DCFS = Densités des coups de foudre au sol mesurées en 1991

Source : Association canadienne de l'électricité, rapport 179 T 382, 1992

André Carrier, MRR, UQAC

Au Québec, comme en Ontario et en Colombie-Britannique, on a étudié les rapports entre la taille et la puissance des cellules orageuses, le nombre et le lieu des éclairs, la hauteur et le lieu des précipitations et les taux d'allumage des incendies. Kourtz *et al.* ont constaté que les petits orages de la fin de l'après-midi causaient plus de feux de forêt que les gros orages. Les mêmes auteurs indiquent que la fréquence des incendies causés par la foudre dépend de l'emplacement et de la gravité des orages ainsi que de la proximité de l'éclair par rapport au centre de l'orage.

CHAPITRE IV DISCUSSION

CHAPITRE IV DISCUSSION

4.1 Qualité de la classification supervisée

Nous allons étudier et évaluer la classification par rapport à la précision de chacune des classes prise séparément et les comparer entre elles en nous basant sur les statistiques de la matrice de confusion (page suivante). Dans un deuxième temps, nous allons comparer les résultats de la carte de la forêt boréale du Québec avec celle des régions écologiques.

Dans l'ensemble, la classification dirigée par maximum de vraisemblance a donné de bons résultats. Seulement 5,65% du territoire demeure non-classifié, ce qui nous apparaît acceptable pour un territoire aussi vaste (voir le tableau 12). Le territoire non classifié se retrouve particulièrement dans les classes suivantes : en milieu aquatique, le long du fleuve et du golfe Saint-Laurent, du réservoir Gouin et des lacs Mistassini et Saint-Jean, et dans la baie de James (4,3%), dans les nuages (3,8%) et dans les zones marécageuses (2,8%). Malheureusement, une partie du territoire forestier est incluse dans le non classifié et se situe particulièrement sur la haute Côte-Nord, dans les peuplements mélangés à résineux et résineux denses. Les classes qui démontrent beaucoup de confusion sont surtout celles des coupes forestières et des anciens feux. Leurs signatures spectrales se rapprochant, il demeure difficile de les différencier car la régénération après le passage d'un feu ou d'une coupe forestière tend à évoluer de la même façon. La précision des feux anciens n'est que de 50,7 %

TABLEAU 12 : MATRICE DE CONFUSION DE LA CLASSIFICATION

<u>CLASSES</u>			<u>CLASSIFICATION POUR CHACUNE DES CLASSES (%)</u>													
Code	Nom	Pixels	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
5	Feux récents	579	1,7	93,4	2,9	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,7
10	Feux anciens	1 104	0,4	2,7	50,7	16,2	1,4	0,0	0,0	4,6	0,2	0,0	13,0	10,8	0,0	0,0
20	Coupes	525	1,3	1,1	28,2	34,1	1,1	0,6	0,8	3,8	0,2	0,4	12,8	15,6	0,0	0,0
30	Résineux	5 405	1,4	0,0	0,0	0,0	90,0	5,2	0,0	0,6	1,4	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0
40	Mél. à résineux	1 641	0,7	0,0	0,0	0,2	1,3	89,4	3,8	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	Mél. à feuillus	1 547	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	4,5	89,5	0,1	0,0	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0
60	Forêt ouverte	1 118	0,0	0,0	6,5	1,8	3,3	1,4	0,2	81,8	3,6	0,1	0,0	1,3	0,0	0,0
70	Landes boisées	1 119	0,5	0,0	0,1	0,0	2,4	0,0	0,0	1,3	89,8	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0
80	Zones agricoles	980	0,9	0,0	0,0	0,5	0,0	0,2	9,8	1,7	0,0	84,5	2,3	0,0	0,0	0,0
90	Zones urbaines	21	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	76,2	9,5	0,0	4,8
100	Marécages	1 496	2,8	0,0	5,5	0,7	0,3	0,0	0,0	1,3	0,7	0,0	0,3	88,3	0,0	0,0
110	Eau	39 439	4,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,6	0,0
120	Nuages	2 230	3,8	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	3,0	92,7

Moyenne de précision: **81,24 %**
 Précision totale: **92,38 %**

et celle des coupes de 34,7 %. Il existe 13% de confusion entre les feux anciens et les zones urbaines et 10,8 % avec les zones marécageuses. Cette comparaison s'applique surtout pour les feux et les marécages situés près de la baie de James. Tout cela nous amène à comparer la superficie des feux anciens et nouveaux provenant des statistiques des feux survenus depuis 1972 d'une part, et de la classification même d'autre part. Entre 1972 et 1994, il s'est brûlé 4 293 801 hectares de forêt boréale. La classification indique plutôt un brûlé de 3 169 111 hectares (voir le tableau 13). Donc, il y a une différence de plus d'un million d'hectares entre ces données, ce qui s'explique en partie par la confusion entre la classe des feux anciens et d'autres classes, en particulier celle des coupes forestières.

En plus d'être associées aux anciens feux, les coupes forestières se mélangent aussi aux tourbières (15,6%) et aux zones urbaines (12,8%). La troisième classe qui présente une précision inférieure à 80 % est celle des zones urbaines avec 76,2 % qui se confond d'ailleurs avec les zones marécageuses (9,5%). Il n'y a donc que trois classes qui présentent une précision inférieure à la moyenne, celles des coupes forestières, des anciens feux et des zones urbaines. Les classes présentant la meilleure précision sont celles de l'eau avec 95,6% (4,3 % est considéré non-classifié), la classe des feux récents (93,4%) et celle des nuages (92,7%).

Il existe certaines ressemblances entre la carte classifiée par satellite et celle des régions écologiques élaborée par Michel Thibault du ministère des Ressources naturelles du Québec. Avec ces deux cartes, on peut associer certaines limites des principaux groupements forestiers. D'Ouest en est, on remarque une bande de forêts ouvertes juste au Sud de la baie de James qui semble associée à la région écologique (10b) de la pessière blanche à sapin et sapinière à épinette blanche.

Les limites Sud et Nord de la forêt ouverte comprises entre la zone marécageuse de la baie de James et le lac Mistassini correspondent sensiblement aux mêmes limites que la pessière noire à mousses (12a, 12b, 12c, et 12d). Toutefois, ceci est beaucoup moins évident pour la partie est du lac Mistassini.

Dans la partie Sud-est du territoire d'étude, on remarque la présence de terres agricoles et de forêts ouvertes difficilement associables aux régions écologiques de la sapinière à bouleau blanc (7a1 et 7b, 8c et 8c2). Toutefois, près des régions 8c2 (dominées par la pinède grise sur stations sèches) et 9d (présence de forêt rabougrie et de krummholz) correspond une zone importante de mélangés à résineux. Ensuite, plus à l'est, la zone de forêt mélangée incluant les régions 6a, 6b et 5e de la carte écologique correspond étroitement au groupement de mélangés à feuillus de la classification, situé aux alentours du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Au Nord et au Sud de cette région, il y a des massifs de mélangés à résineux associés à certaines régions de la sapinière à bouleau blanc (8e, 8f, 8h, 8i et 8j).

Au centre de la carte classifiée par satellite, on constate de gros massifs de conifères denses rattachés aux régions écologiques 9d, 11a, 12d et 12e. La région 13b, associée à la toundra alpine, correspond à une zone bien définie de forêt ouverte située juste au Nord-est du réservoir Manicougan. En basse Côte-Nord, on remarque que les régions écologiques 11c (forêts plus claires que dans les régions 9d) semblent associées à certains secteurs de forêts ouvertes et de landes boisées localisées entre des groupements de résineux denses.

Enfin nous pouvons dire que dans l'ensemble, une telle comparaison entre les deux cartes discutées précédemment demeure intéressante bien que difficile à réaliser puisque les documents ne présentent pas exactement la même information. La carte des régions

écologiques montre les principales essences sur le terrain tandis que la classification satellitaire fait ressortir les principaux groupements forestiers de type coniférien ou mélangé, par exemple.

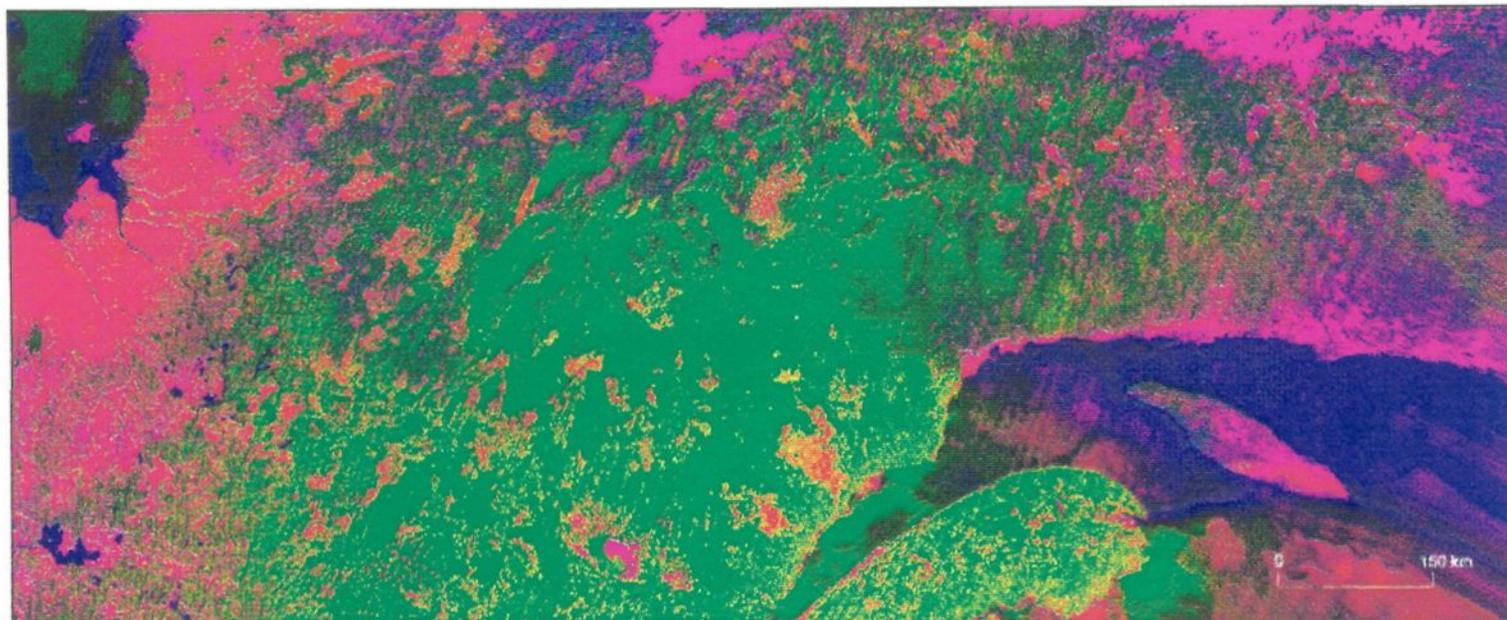
4.2 Utilité des indices "NDVI" et "GEMI"

L'indice "NDVI" (voir la carte 19) fait ressortir les régions qui semblent avoir la plus grande concentration de matière ligneuse. En effet, on remarque en vert foncé que les massifs de conifères denses au centre du territoire ressortent beaucoup ainsi que les peuplements de mélangés à conifères et à feuillus. Par corollaire, il y a de la confusion dans le fleuve et le golfe Saint-Laurent dérivée du NDVI. D'une façon générale, les teintes rosées de la carte correspondent à des zones forestières dégagées ou moins denses. Toutefois, à notre avis, il serait très intéressant d'appliquer cet indice, de façon rigoureuse, sur plusieurs images NOAA couvrant toute la période du printemps jusqu'au tout début de l'automne. Ceci nous permettrait de distinguer davantage les diverses classes de végétation et l'évolution de celle-ci pour le territoire étudié. À cet effet, nous verrons une comparaison des deux indices concernant la distinction de plusieurs types de couverts forestiers.

D'une façon similaire, l'indice "GEMI" fait ressortir également les régions à forte densité de végétation (voir la carte 20), mais présente aussi de la confusion pour les mêmes cours d'eau que sur la carte 19. Toutefois, en moyenne et en basse Côte-Nord, les régions aux peuplements denses ne sont pas aussi visibles qu'avec l'indice "NDVI". Cela peut s'expliquer par le fait qu'il existe à cet endroit un voile atmosphérique ou une bande de nuages de haute altitude qui perturbe l'information au sol le long d'une diagonale passant au

L'INDICE DE VÉGÉTATION " NDVI "

POUR LA CARACTÉRISATION DE LA FORÊT BORÉALE DU QUÉBEC



Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

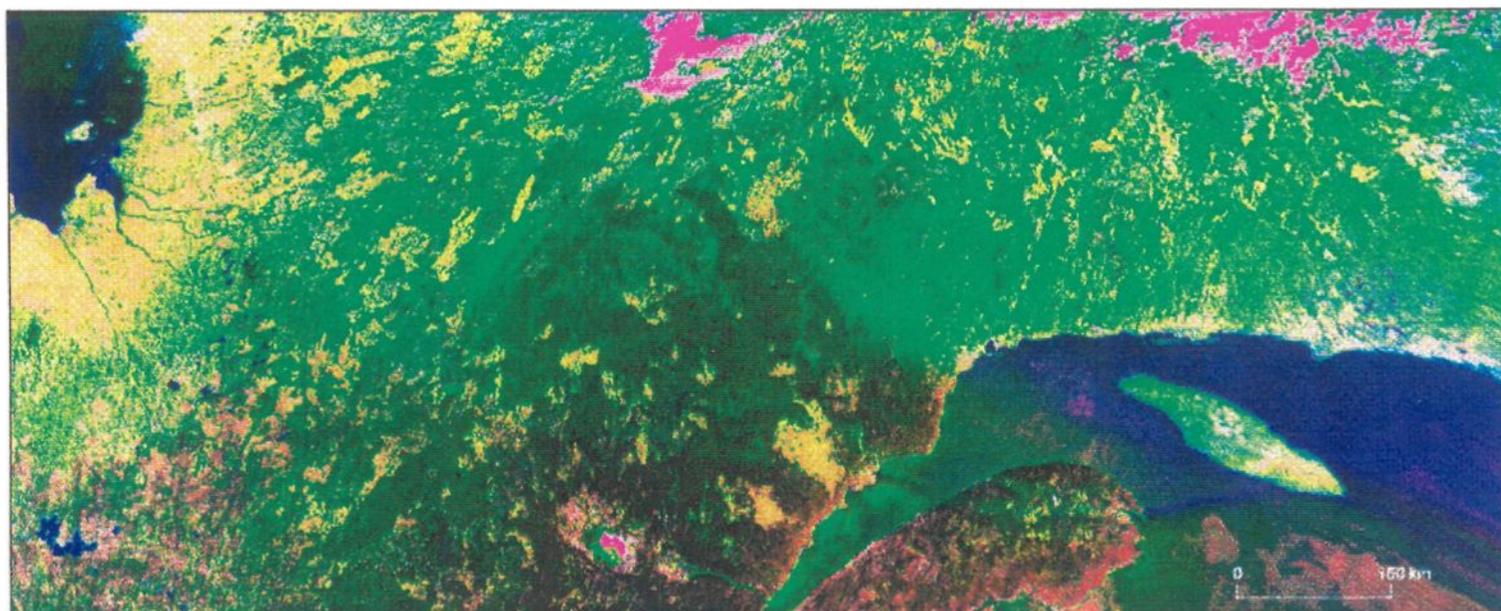
- Canal 1 (Rouge du visible) 0,580 - 0,680 μm
- NDVI (canal2-canal1 / canal2+canal1)
- Canal 3 (Infrarouge moyen) 3,550 - 3,930 μm

Sud du réservoir Manicouagan et à la limite Nord de la péninsule gaspésienne. L'indice "GEMI" étant plus sensible aux nuages, nous le verrons plus loin, empêche en une certaine mesure la distinction de ce type de couvert à cet endroit précis.

Comparons ensemble les deux indices pour la distinction de différentes surfaces terrestres, telles que les résineux, les mélangés, les feux, etc. D'abord, pour l'image du printemps (celle du 14 juin 1993), nous constatons que l'indice "GEMI" fait très bien ressortir les principaux groupements forestiers entre eux (résineux et mélangés) en les distinguant des milieux plus ouverts tels que les feux et les zones agricoles. Toutefois, ils sont difficiles à différencier des zones urbaines (voir les tableaux 13 et 14). Les nuages ressortent bien des autres surfaces. Les feux se distinguent très bien par une accentuation de l'image satellitaire par la racine carrée. Quant à l'indice "NDVI", il fait bien ressortir les couverts forestiers mais demeure moins précis en ce qui concerne les classes de mélangés. Pour cette image, l'indice "NDVI" fait également bien ressortir les feux de forêt, mais pour les nuages, il demeure moins efficace (Carrier, 1994). Dans l'image du 1er juillet 1993, nous remarquons que le "GEMI" fait aussi ressortir les mélangés par rapport aux autres surfaces. On distingue très bien les feux des nuages, ce qui n'est pas aussi évident avec le deuxième indice (NDVI).

En général, l'indice "NDVI" donne de bons résultats pour la discrimination des différentes surfaces forestières, mais il n'est pas aussi efficace pour les peuplements de mélangés. La troisième image utilisée, celle du 28 août, démontre une bonne différenciation entre les diverses surfaces, sauf que les résineux ressortent moins bien par rapport aux feux. Contrairement à l'image du mois de juin. L'indice "NDVI" fait un peu moins ressortir la

L'INDICE DE VÉGÉTATION "GEMI" POUR LA CARACTÉRISATION DE LA FORÊT BORÉALE DU QUÉBEC



Source: Image NOAA du 4 septembre 1994 captée
au Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

- Canal 1 (Rouge du visible) 0,580 - 0,680 μm
- GEMI $(n - 0.125n) - (\text{canal 1} - 0.125 / 1 - \text{canal 1})$ $n = \frac{2(c2^2 - c1^2) + 1.5c2 + 0.5c1}{c2 + c1 + 0.5}$
- Canal 3 (Infrarouge moyen) 3,550 - 3,930 μm

**COMPARAISON DES INDICES DE VÉGÉTATION "NDVI" ET "GEMI"
POUR DIFFÉRENTES SURFACES**

Images : 14 juin et 1 juillet 1993

SURFACES	RÉSINEUX		MÉLANGÉS		FEUILLUS		FEUX		ZONES AGRICOLES		ZONES URBAINES		EAU		NUAGES		
	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	
<u>Image du 14 juin</u>																	
Résineux	---	---	B	B à E	B à E	E	E	E	E	E	E	F	F	B	B	E	F à B
Mélangés	B	B à E	---	---	B	B	E	E	E	B	B	B	B	B	B	E	B
Feuillus	B à E	E	B	B	---	---	E	E	F	F	B	B	B	B	E	E	B
Feux	E	E	E	E	E	E	---	---	E	E	E	F	F	B	F à B	E	F
Z. agricoles	E	E	E	B	F	F	E	E	---	---	E	B	E	B	E	B	F
Z. urbaines	F	F	B	B	B	B	E	F	E	B	---	---	F	F	E	B	F
Eau	B	B	B	B	E	B	B	F à B	E	B	F	F	---	---	B	B	F
Nuages	E	F à B	E	B	E	B	E	F	E	B	B	F	B	F	---	---	---
<u>Image du 1 juillet</u>																	
Résineux	---	---	B	B	E	B	B	F	B	B	F	F	B	B	E	B	B
Mélangés	B	B	---	---	B	F	E	B	B	F	F	F	B	B	E	E	B
Feuillus	E	B	B	F	---	---	E	B	F	F	B	B	B	E	E	E	B
Feux	B	F	E	B	E	B	---	---	E	E	B	F	B	B	F	B	F
Z. agricoles	B	B	B	F	F	F	E	E	---	---	B	B	E	B	E	E	F
Z. urbaines	F	F	F	F	B	B	B	F	B	B	---	---	B	F	E	E	F
Eau	B	B	E	B	E	E	B	F	E	B	B	F	---	---	B	B	F
Nuages	E	B	E	B	E	B	B	F	E	E	E	F	B	F	---	---	---

Légende: E= excellent
B=bonne
F= faible

Tableau 13

**COMPARAISON DES INDICES DE VÉGÉTATION "NDVI" ET "GEMI"
POUR DIFFÉRENTES SURFACES
(suite)**

IMAGES: 28 Août 1993 et 4 septembre 1994

SURFACES	RÉSINEUX		MÉLANGÉS		FEUILLUS		FEUX		ZONES AGRICOLES		ZONES URBAINES		EAU		NUAGES	
	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI	GEMI	NDVI
<u>Image du 28 août</u>																
Résineux	---	---	B	B	B à E	F	F	F	E	E	F	F	B	B	E	B
Mélangés	B	B	---	---	B	F à B	B	B	E	B	F	F	B	B	E	B
Feuillus	B à E	B	B	F à B	---	---	E	B	B	F	B	B	E	B	E	B
Feux	F	F	B	B	E	B	---	---	E	E	F	F	B	B	B	F
Z. agricoles	E	E	E	B	B	F	E	E	---	---	B	B	E	B	E	B
Z. urbaines	F	F	F	F	B	B	F	F	B	B	---	---	B	B	E	F
Eau	B	B	B	B	E	B	B	B	E	B	B	B	---	---	B	F
Nuages	E	B	E	B	E	B	B	F	E	B	E	F	B	F	---	---
<u>Image du 4 sept.94</u>																
Résineux	---	---	E	E	E	E	F	F	E	E	F	F	B	B	B	F à B
Mélangés	E	E	---	---	B	B	B	B	B	B	F	F	E	B	E	B
Feuillus	E	E	B	B	---	---	E	B	F à B	F	B	B	E	B	E	B
Feux	F	F	B	B	E	B	---	---	E	E	F	F	F	B	F	F
Z. agricoles	E	E	B	B	F à B	F	E	E	---	---	B	B	E	E	E	B
Z. urbaines	F	F	F	F	B	B	F	F	B	B	---	---	F	F	F	F
Eau	B	B	E	B	E	B	F	B	E	E	F	F	---	---	B	B
Nuages	B	F à B	E	B	E	B	F	F	E	B	F	F	B	B	---	---

Légende : E= excellente
B=bonne
F= faible

Tableau 14

végétation que l'image du mois de juin.

Les conclusions de cette analyse sont les suivantes pour la discrimination des différents couverts :

- Les résineux**; ressortent aussi bien avec l'un ou l'autre des deux indices.
- Les mélangés**; l'indice "GEMI" demeure plus efficace pour les distinguer.
- Les feuillus**; le "GEMI" est plus efficace.
- Les feux**; ils ressortent et se distinguent mieux avec le "GEMI".
- Les zones agricoles**; plus distinctes avec le "GEMI".
- Les zones urbaines**; comparables avec les deux indices.
- L'eau**; ressort de la même façon avec les deux indices.
- Les nuages**; plus distincts avec l'indice "GEMI".

Nous pouvons rajouter que l'indice "GEMI" fait ressortir davantage les milieux plus ouverts (voir la carte de l'indice "GEMI"). Aussi, les zones marécageuses, les feux et les zones agricoles ressortent mieux avec l'indice "GEMI", mais ceci est différent pour les groupements de résineux denses ou de mélangés, car ils ressortent mieux avec l'indice de végétation "NDVI".

4.3 Analyse spatiale et temporelle des feux

Concernant les feux, le territoire de la forêt boréale n'est pas affecté partout de la même façon. En effet, l'Ouest de la forêt boréale est davantage touché par les feux, particulièrement ceux de grande surface. Le secteur situé à l'Ouest et au Nord-Ouest du lac Mistassini apparaît comme le plus affecté par ce phénomène. Il faut mentionner l'importance de la superficie brûlée par les grands feux comparativement à ceux plus petits. Les incendies de 15 000 hectares et plus ont brûlé 3 428 727 hectares sur 4 293 801, c'est-à-dire 80% de la superficie totale brûlée avec seulement 54 incendies sur 9 916 répertoriés.

Les années 1976, 1983, 1986, 1989 et 1991 ressortent comme les plus importantes pour la superficie brûlée et pour le nombre de feux, quoique l'année 1983 se distingue particulièrement avec 18 feux sur une possibilité de 54 répertoriés en 23 ans, et l'année 1989 avec plus d'un million d'hectares brûlés. Mentionnons également que ces années importantes sont précédées ou suivies par des années où l'on ne retrouve aucun grand incendie de forêt, à l'exception de l'année 1977 où l'on note un grand feu d'origine humaine. La période critique pour le déclenchement des grands feux correspond au mois de juin, particulièrement les troisième et quatrième semaines. On retrouve 38 feux sur les 54 répertoriés dans ce mois, les autres se produisant dans les mois de mai, juillet et août.

De plus, à partir de la période couvrant les feux (1972 à 1994) et de la superficie totale brûlée du territoire à l'étude, nous avons fait une estimation quant à la période requise pour brûler une superficie équivalente à celle de la forêt boréale du Québec, estimée à 70 000 000 hectares environ ou 700 000 kilomètres carrés. En 23 années, il s'est brûlé 4 293 801 hectares. Alors, en faisant une simple règle de trois, nous arrivons à une période de 375

années pour brûler une telle superficie. Toutefois, nous avons calculé les moyennes de superficie de 5, 10, 15 et 20 ans pour les 23 années de feux (voir le tableau 15). Les principaux résultats démontrent que la moyenne des 5 ans est de 488 années pour brûler la superficie de la forêt boréale québécoise, celle des 10 ans est de 388 ans, celle correspondant aux moyennes de 15 ans demeure fixée à 366 et la dernière, celle des moyennes de 20 ans est de 340 années. Si on fait la moyenne de ces quatre moyennes, on obtient une moyenne générale de 395 années.

Donc, on peut supposer une période située entre 375 et 395 ans pour brûler l'ensemble de la superficie de la forêt boréale du Québec. Toutefois, il faut considérer qu'il existe plusieurs feux qui n'ont jamais été répertoriés pour plusieurs raisons. Puis, on ne peut pas oublier également la récurrence des feux au même endroit, statistique que l'on ne possède pas encore. Ainsi, on peut s'attendre à une période légèrement inférieure à 375 ans pour le brûlis complet du territoire à l'étude.

4.4 Relations entre les paramètres de géographie physique et la localisation des feux de forêt

Aucune relation n'apparaît entre la structure géologique et la situation des feux de grande dimension du territoire d'étude. Quant aux dépôts de surface, notons la prédominance des dépôts de till au centre du territoire, de sédiments organiques au Nord-Ouest, de sédiments lacustres et fluviaux au Sud-Ouest, de roche en place à l'est. En comparant ces données avec la carte des feux, on remarque que plusieurs grands feux sont situés sur des sédiments organiques dans la région de la Baie de James. Plusieurs feux sont localisés aussi sur du till mince et épais, mais d'une façon plus éparse. Il a déjà été dit que l'épaisseur de la

litière forestière est importante dans le déclenchement d'un feu de forêt. Or, la forte présence de sédiments organiques dans la région de la Baie de James en est peut-être la preuve ou du moins un élément qui favorise un tel phénomène.

TABLEAU 15 : MOYENNES DE 5, 10, 15 ET 20 ANS DE LA SUPERFICIE BRÛLÉE

MOYENNES DE 5 ANS	MOYENNES DE 10 ANS	MOYENNES DE 15 ANS	MOYENNES DE 20 ANS
328	539	439	339
347	574	451	345
353	347	449	338
369	355	302	339
372	348	298	
1514	529	343	X = 340
1658	530	345	
341	520	334	
342	277	330	
327	271		
321	247	X = 366	
315	247		
1094	330		
233	324		
231			
201	X = 388		
203			
194			
534			
X = 488			

Le relief est probablement le paramètre de géographie physique possédant le plus de relations avec la localisation des feux. Sur la carte du relief, le secteur associé à la Baie de James et au Nord du lac Mistassini demeure peu accidenté comparativement au centre du territoire d'étude. On constate aussi que l'altitude et les pentes augmentent d'Ouest en est, à partir de l'Abitibi. Nous avons déjà indiqué à quelques reprises une présence plus marquée des feux à l'Ouest qu'à l'est de la zone d'étude. Il faut dire que plus on monte en altitude plus les températures tendent à se refroidir et qu'on retrouve généralement plus de précipitations en régions montagneuses qu'en terrains plats. Le fait d'avoir des pentes plus accidentées dans ces mêmes régions a probablement certains effets sur ce phénomène puisque les pentes fortes offrent des conditions différentes à la propagation d'un feu de forêt.

4.5 Relations entre les paramètres climatiques et la localisation des feux de forêt

Nous devons d'abord préciser que nous traiterons ici de chacun des paramètres climatiques discutés à la partie 3.6 de ce travail en rapport avec la localisation des grands feux de la zone boréale.

En comparant la carte des températures moyennes annuelles avec celle des feux, on constate que la majorité des grands feux sont situés entre les isothermes 0 et -2,5 degrés Celcius, surtout dans la partie Ouest du territoire. Mais, on remarque également que l'espace entre ces mêmes isothermes couvre beaucoup plus de surface à l'Ouest qu'à l'est, et que l'isotherme de -2,5 degrés Celcius monte plus au Nord dans la partie Ouest, les températures moyennes étant plus froides à l'est pour une même latitude donnée. Il semble que plus au remonte vers le Nord, dans la partie est, et plus il fait froid comparativement à l'Ouest. Nous retrouvons plus de feux à l'Ouest comparativement à l'est, ce qui nous porte à croire qu'il

existe une certaine relation entre ces deux phénomènes. Toutefois, regardons d'autres possibilités avec les paramètres suivants.

Nous avons déjà constaté sur la carte des températures moyennes maximales en juin qu'il fait généralement plus chaud pendant le mois de juin à l'Ouest de la zone d'étude (surtout à partir du 49^{ième} parallèle Nord) comparativement à l'est du même territoire. L'isotherme de 17,5 degrés Celcius descend jusqu'au 49^{ième} parallèle Nord à l'est et diffère beaucoup à l'Ouest où il remonte jusqu'aux environs du 52^{ième} parallèle Nord.

De plus, il y a un fait intéressant sur cette carte climatique. Nous remarquons un secteur situé au Sud-est du réservoir Pipmuacan caractérisé par des températures supérieures à 20 degrés Celcius. Ce secteur correspond presque exclusivement au grand feu de Baie-Comeau survenu en 1991. Ceci nous laisse croire qu'il existe peut-être à cet endroit un genre de micro-climat influencé par divers facteurs géographiques (vallée encaissée, régions montagneuses etc.). Évidemment, il serait avantageux d'obtenir plus d'informations de géographie physique ou climatiques sur ce secteur en particulier. C'est une recherche qui peut se faire ultérieurement.

En ce qui concerne les relations entre la carte des moyennes des précipitations totales annuelles du Québec boréal et celle des feux, nous pouvons dire que la plupart des feux situés à l'Ouest se retrouvent dans une zone plus sèche que dans la partie est du territoire. C'est spécialement le cas pour le secteur localisé au Nord-Ouest du lac Mistassini où l'on retrouve des précipitations inférieures à 800 millimètres par année. Et si on regarde la même isohyète, on constate qu'elle forme un territoire correspondant grossièrement à un certain nombre de grands feux. Ensuite, l'isohyète suivante, celle de 900 millimètres, semble également

délimiter un certain nombre de feux, partant au Sud-Ouest jusqu'au Nord-est du lac Mistassini.

Concernant les secteurs les moins arrosés et les plus touchés par les feux de forêt par rapport à la carte des moyennes des précipitations totales en juin et sur celle des feux, il appert que la grande région de la Baie de James et celle de la ville de Baie-Comeau sont celles les moins arrosées de la zone d'étude. Moins de 75 millimètres de pluie tombent dans ces régions, ce qui semble très intéressant car à partir de l'isohyète de 75 millimètres à la Baie de James, on y retrouve plusieurs feux juste au Nord. Puis, comme sur la carte des précipitations totales annuelles, il y a une isohyète passant au Sud du lac Mistassini, celle de 87,5 millimètres, qui englobe vers le Nord une bonne partie des grands feux répertoriés.

Ensuite, on remarque une région caractérisée par des précipitations plus abondantes au Nord-est du réservoir Manicouagan avec plus 112,5 millimètres de pluie. Curieusement, on y retrouve quelques feux en importance, tous produits dans le mois de juillet de l'année 1976. Il serait intéressant de connaître les statistiques météorologiques de cette période afin de vérifier s'il existe une relation entre ces feux et les précipitations de l'époque. La région demeurant la plus arrosée pour le mois de juin de toute la zone d'étude correspond à celle de la réserve faunique des Laurentides. Plus de 125 millimètres de pluie arrose ce secteur. Aucun grand feu ne s'y retrouve. Enfin, il faut surtout retenir l'importance de la région de la Baie de James et les relations que l'on peut y faire avec les paramètres climatiques.

Finalement, à partir de la carte des moyennes des précipitations nivales, on peut voir, dans un premier temps, l'inégalité des précipitations nivales entre les régions de l'Ouest et de l'est de la zone d'étude. À l'Ouest, à partir du lac Mistassini, il tombe en moyenne moins de

300 centimètres de neige par année comparativement à plus de 350 à l'est. Le Nord de la région de l'Abitibi et celle de la Baie de James reçoivent relativement peu de neige, ce qui diffère de la région de la Côte-Nord. On peut rajouter également qu'il existe deux petits secteurs présentant moins de 300 centimètres de neige, où ont eu lieu deux grands feux datant de 1983 et de 1991. Ils sont respectivement situés au Sud-est des réservoirs Gouin et Pipmuacan. On peut donc se questionner sur l'importance du couvert nival par rapport au déclenchement d'un feu de forêt. Ce que l'on peut dire, c'est que la majorité des grands feux de forêt se produisent tard au printemps et que la neige reçue pendant l'hiver fournit une quantité d'eau de ruissellement importante. Il y a probablement là certains liens entre l'humidité du combustible forestier ou de sa litière et la quantité d'eau fournie par la fonte du couvert nival au printemps.

Pour ce qui est des années les plus chaudes et les plus froides, nous croyons que la relation est plutôt contradictoire entre ces paramètres et les feux. L'année 1972 ressort comme la plus froide (12 fois sur 13) et elle se caractérise comme la troisième année avec le plus grand nombre de feux. Toutefois, avec l'année la plus chaude de 1981 ((8 fois sur 13) (revoir le tableau 11)), nous avons noté deux grands feux et 674 plus petits, se qualifiant au deuxième rang pour le grand nombre de feux. En ce qui concerne les années les plus sèches ou plus humides, on constate qu'il n'y a pas d'année qui se distingue plus qu'une autre. L'année 1983 a reçu à trois reprises plus de précipitations que les dix autres stations. C'est en 1983 que l'on retrouve le plus de feux dans toute la zone d'étude. L'année 1987 demeure la moins arrosée 5 fois sur 13. Or, aucun grand feu et seulement 374 inférieurs à 15 000 hectares sont répertoriés pour cette année-là, demeurant une des années les moins touchées par les incendies de forêt. Même si le nombre de stations météorologiques était peu exhaustif

pour cette partie de la zone d'étude, on se doit de se demander si il y a une relation entre ces paramètres et le nombre ou la superficie des feux localisés dans le territoire de recherche.

En plus de ces quelques observations climatiques concernant le Québec boréal, nous pouvons citer les observations à l'échelle du pays, à savoir qu'il existe une répartition différente des conditions météorologiques. Entre autres, la sévérité de ces conditions météorologiques du point de vue des incendies augmente progressivement d'est en Ouest dans tout le pays. De plus, au niveau latitudinal, on remarque que l'heure à laquelle la température est maximale et l'humidité relative minimale en plein été est de plus en plus tardive si la latitude demeure élevée, signifiant par le fait même que le combustible forestier reste inflammable une plus grande partie du jour lorsqu'on est plus près du Nord (Van Wagner, 1987). On peut supposer une plus grande fragilité des combustibles au Nord de la zone d'étude (ça pourrait être le cas pour le secteur de la Baie de James), mais si on regarde le nombre peu élevé de grands feux situés à l'est, alors on peut se demander s'il ne faut pas encore une fois considérer l'ensemble de tous les facteurs pouvant influencer un feu de forêt.

Ainsi, la prévision des feux de forêt demeure un travail complexe mettant en relation plusieurs éléments qui réagissent entre eux. Afin de démontrer cette complexité, nous avons regardé brièvement les feux de l'année 1995. Notons tout d'abord que c'est une année qui a été très marquée par les feux de forêt. Les dernières données indiquent 1 145 feux dans la zone de protection intensive avec une superficie brûlée de 195 576,5 hectares, et 120 feux pour 502 150,2 hectares brûlés dans la section restreinte de protection (Ministère des Ressources naturelles, Québec, 1995). Mais ce qui diffère le plus en 1995, c'est la recrudescence des feux pendant le mois d'août. En effet, normalement il y a une diminution du nombre et de la superficie couverte par les feux après le mois de juin (demeurant le mois le

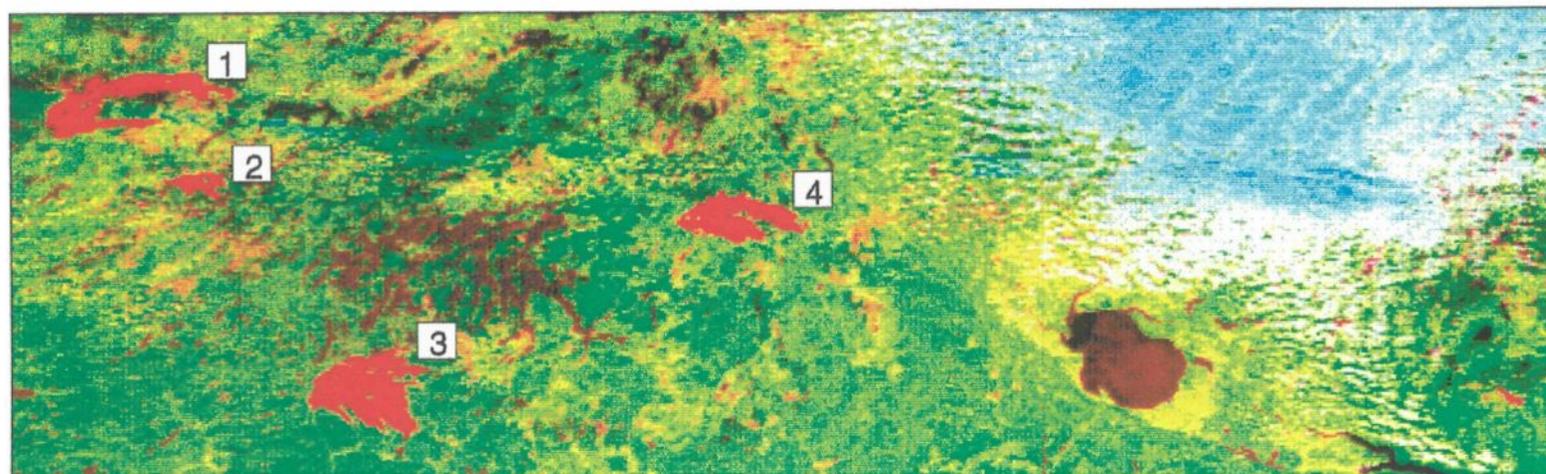
plus propice aux incendies de forêt). Or, cette année, il s'est produit presque autant de feux en août qu'en juin, mais en brûlant 15 fois plus de forêt en août (94% de toute la superficie brûlée pour la zone de protection intensive).

De plus, de 1972 à 1994, nous avons indiqué une moyenne de 44 hectares par feu pour tous ceux produits dans la zone de protection intensive. En 1995, la moyenne par feu est de 170,8 hectares. Donc, c'est une année marquée par un grand nombre de feux mais aussi par des feux de grande superficie, tels que ceux présentés à la carte de la page suivante. Nous pouvons dire également que les feux présentés ici sont situés surtout dans des peuplements de mélangés à résineux localisés dans des secteurs à risque faible et modéré de feux de forêt par la foudre. Alors, aurions-nous pu prévoir l'intensité ou l'emplacement de ces feux? C'est une question à laquelle il est difficile à répondre car nous devrions étudier tous les facteurs qui influencent le phénomène des feux. Mais, nous pouvons dire que l'été 1995 fut chaud et sec, particulièrement au cours du mois d'août, influençant ainsi le niveau d'humidité des sols et des combustibles.

4.6 Secteurs à risque élevé d'incendie

Les secteurs ou plutôt celui le plus affecté par les grands feux est sans contredit le secteur situé à l'Ouest et au Nord-Ouest du lac Mistassini. Il est compris approximativement entre les parallèles 51 et 53 Nord et les méridiens 74 et 80 Ouest et correspond au territoire de la Baie de James. On y retrouve les deux tiers des grands feux précédemment cartographiés (retour à la carte 6), c'est-à-dire environ 36 sur 54 répertoriés. Les 18 autres feux sont répartis de façon plus isolée sur le reste du territoire demeurant à l'étude.

GRANDS FEUX DE FORÊT DU QUÉBEC BORÉAL POUR L'ANNÉE 1995



Source : Image du 8 septembre 1995 captée au
Laboratoire de télédétection de l'UQAC

André Carrier, MRR, UQAC

Feux de 1995

	Canal 1 (Rouge du visible)	0,580 - 0,680 μm
	Canal 2 (Proche infrarouge)	0,725 - 1,100 μm
	Canal 3 (Infrarouge thermique)	3,550 - 3,930 μm

	<u>Superficie (ha)</u>
1- Lebel sur Quévillon	48 890
2- Maricourt	7 827
3- Parent	64 543
4- Belle-Plage	40 602

De plus, nous aurions pu élaborer une carte des zones à risque de feux de forêt par la foudre à partir uniquement du nombre de feux survenus depuis 1972 dans le territoire de recherche. Ceci a été réalisé par la Direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles du Québec. Sur la dite carte (voir la copie à l'annexe 3), nous pouvons y constater les secteurs qui présentent des risques de pratiquement nul à élevé d'incendie causé par la foudre. La période couverte par les feux est de 1977 à 1992, c'est-à-dire 15 ans. Dans la partie qui nous intéresse, entre les parallèles 48 et 53 Nord, ils ont répertoriés quatre secteurs plus touchés par les feux (qui incluent dans ce cas-ci les petits et les grands incendies). Le premier longe la rive Nord du fleuve Saint-Laurent entre Tadoussac et Baie-Comeau. Il inclut les grands feux de Baie-Comeau de 1991. Ensuite, le deuxième secteur en importance se retrouve au Sud du lac Mistassini, près de Chibougamau. Les deux autres secteurs à risque élevé sont situés à Chute-des-Passes et près de la municipalité de Parent.

À partir de cette carte et de nos propres observations, il serait intéressant d'étudier ce même territoire à plus grande échelle permettant d'analyser en profondeur tous les paramètres importants qui influencent le déclenchement d'un feu de forêt de grande envergure. Des données plus détaillées sur l'état des combustibles forestiers et sur les conditions climatiques demeurent essentielles à cet effet. Dans un autre moment, il serait possible d'en arriver à construire une grille divisant le territoire de recherche en plusieurs secteurs, sur lesquels nous pourrions retrouver des paramètres qualifiant les dits secteurs à risque ou non d'incendie selon certains critères préalablement déterminés. Ces critères pourraient ressembler à ceux déjà mentionnés plus tôt. Inévitablement, tout ceci serait un travail de grande envergure puisqu'il faudrait constituer et accumuler beaucoup d'informations sur l'ensemble de ce même territoire associé à la forêt boréale du Québec.

CONCLUSION

La forêt boréale du Québec est constituée d'éléments complexes qui assurent une dynamique particulière entre les espèces végétales et les conditions externes qui s'y rattachent. Les feux de forêt demeurent un des phénomènes les plus dynamiques associé à la régénération de la forêt boréale. Les différentes recherches dans le domaine forestier ont démontré depuis peu l'importance des incendies de forêt en milieu boréal, phénomène souvent considéré comme une perte de la matière ligneuse disponible. Leurs répercussions sont plutôt positives car ils influencent les cycles des nutriments et maintiennent la diversité, la productivité et la stabilité à long terme des écosystèmes boréaux en influençant leur évolution et leur fonctionnement. Ils enclenchent le renouvellement par graines de certaines espèces conifériennes telles que l'épinette noire et le pin gris (Heinselman, 1973).

Afin de cartographier et d'étudier les feux de forêt (principalement ceux de 15 000 hectares et plus), nous avons utilisé la télédétection satellitaire par images NOAA. Entre autres, les cinq bandes spectrales du capteur AVHRR nous permettent d'étudier la réflectance des sols et des minéraux à l'aide de la bande 1 associée au spectre rouge du visible, la brillance du couvert végétal avec la bande 2 (proche infrarouge) et l'émittance des températures de surface des objets à l'aide des bandes 3, 4 et 5 situées dans l'infrarouge thermique du spectre électromagnétique. En ce qui concerne l'émittance des surfaces carbonisées par les feux, nous avons retenu la bande 3 qui demeure généralement la plus appropriée et la plus utilisée à cette fin, puisqu'elle se rapproche davantage du spectre électromagnétique des feux actifs situés entre 5,8 et 2,9 micromètres.

De plus, malgré la faible résolution du capteur AVHRR, la grande surface de territoire couverte par les images NOAA nous permet d'obtenir une vue d'ensemble intéressante sur toute la forêt boréale du Québec, et ce avec une seule image, et nous permet également la distinction des aires incendiées par les feux récents et anciens pouvant dater de plus de vingt ans. Ceci a été d'autant plus possible avec la station de réception d'images NOAA du Laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi qui capte à chaque jour plusieurs images satellitaires. En plus de la détection et de la cartographie des feux, les images NOAA offrent aussi la possibilité d'étudier leur développement spatial et temporel et les conséquences de ceux-ci en ce qui a trait à la régénération après le passage des feux. À l'aide de certains indices de végétation tels que le NDVI et le GEMI, il est possible d'étudier l'humidité du couvert végétal et les conditions climatiques pouvant favoriser le déclenchement d'un feu de forêt.

Évidemment, il ne faut pas croire que la télédétection demeure un tout dans l'étude des feux de forêt (nous avons vu déjà plusieurs facteurs qui influencent la dynamique des incendies de forêt), mais un outil important pouvant faciliter la compréhension de certains aspects du phénomène.

Nous avons vu que le territoire de la forêt boréale du Québec n'est pas affecté partout de la même façon par les feux de forêt. En effet, nous retrouvons généralement plus de grands feux dans l'Ouest du territoire comparativement à l'est, surtout dans le secteur situé à l'Ouest et au Nord-Ouest du lac Mistassini. Plus de la moitié des feux cartographiés sont localisés dans ce secteur. Certains d'entre eux (celui de Baie-Comeau en 1991 et celui en 1983 au Sud-est du réservoir Gouin) peuvent même être associés à certaines données climatiques spécifiques, telles que l'épaisseur du couvert nival et les températures maximales

moyennes en juin. Nous avons répertorié 54 grands incendies de forêt de 1972 à 1994, qui à eux seuls, ont brûlé 3 428 727 hectares de forêt, c'est-à-dire plus de 80% du nombre total d'hectares brûlés. Les feux de moins de 15 000 hectares, au nombre de 9 862, ont brûlé plus de 865 074 hectares soit 20% du territoire brûlé de la forêt boréale québécoise.

La répartition des grands feux demeure aussi inégale d'une année à l'autre, puisqu'on retrouve 46 feux sur 54 répertoriés pour les années 1976, 1983, 1986, 1989 et 1991. L'année 1983 regroupe à elle seule 18 des 54 feux, demeurant une année record pour le nombre de feu. Mais en termes de superficie, c'est à 1989 que l'on porte attention parce qu'il s'est brûlé plus d'un million d'hectares surtout par les grands feux de la Baie de James. Retenons aussi que le territoire de recherche ne jouit pas partout de la même protection des forêts contre le feu, puisque la zone de protection intensive s'arrête aux environs du 51^{ème} parallèle Nord. Ainsi, certaines de nos statistiques se trouvent par le fait même incluses dans celles de cette zone, ce qui permet d'affirmer une plus grande présence des grands incendies à partir du 51° degré de latitude Nord.

Avec ces statistiques sur les feux survenus depuis 1972 dans la zone d'étude, nous pouvons répéter l'estimation faite auparavant sur la période nécessaire pour brûler l'équivalent de la superficie de la forêt boréale du Québec. Il faut entre 375 et 395 années pour brûler les 70 000 000 hectares ou 700 000 kilomètres carrés de la forêt en question. Mais, n'oublions pas la récurrence des feux au même endroit et le manque de statistiques sur les feux non répertoriés et cartographiés précédemment. Donc, on pourrait s'attendre à un chiffre quelque peu inférieur, considérant ces deux facteurs que l'on ne peut pas omettre.

Nous avons également étudié plusieurs paramètres de géographie physique et climatiques que nous jugeons importants dans l'étude des feux de forêt. Ceux qui influencent le plus, à notre avis, la répartition inégale des grands incendies de forêt de la zone d'étude (voir le tableau 16) concernent les différences dans le relief par l'intermédiaire de l'altitude et de la pente, l'épaisseur du couvert nival qui influence sur la quantité d'eau disponible au printemps, et les précipitations et les températures du mois de juin au cours duquel se produit la majorité des grands feux, surtout pendant la troisième et quatrième semaine. La fréquence de la foudre demeure aussi un facteur très important puisque nous avons constaté que les régions plus à l'Ouest semblent plus touchées par ce phénomène. Toutefois, c'est au Sud du Québec que le nombre d'heures de tonnerre et la densité des coups de foudre au sol sont les plus fréquents.

Tableau 16 : Facteurs d'influence pour le déclenchement d'un grand feu de forêt

Faible altitude + faible pente + mince couvert nival + faibles précipitations au printemps (juin)
 + températures élevées au printemps (juin) + fréquence élevée de la foudre :

=> Grand feu de forêt

Les quelques paramètres de géographie physique et climatiques étudiés lors de cette recherche peuvent servir à mieux comprendre toute la dynamique des feux situés dans la forêt boréale et aident dans une certaine mesure à la prédiction des feux de foudre. Mais, nous devons considérer bien d'autres facteurs tels que la connaissance approfondie de la foudre, en particulier, l'emplacement exact de chaque éclair, des données critiques comme l'âge du combustible et sa densité apparente, la profondeur de la couche organique et le taux d'humidité, la vitesse et la direction des vents, et des renseignements plus détaillés sur les

précipitations (hauteur, intensité et surtout la durée) (Kourtz et Todd, 1993). Donc, il faut prendre en considération l'ensemble des paramètres précédents pour permettre une planification et une prévision efficace des incendies de forêt causés spécialement par la foudre.

Enfin, découlant de ce mémoire, nous pouvons citer les avenues possibles à court et à moyen terme. D'abord, il serait intéressant de travailler davantage avec la télédétection, surtout avec les indices de végétation nous apportant des renseignements supplémentaires sur l'état du couvert forestier. Puis, étudier plusieurs des paramètres climatiques pour la période précédant chacun des 54 grands feux répertoriés, c'est-à-dire les températures, les précipitations, l'humidité relative etc., ceci étant possible avec les banques de données météorologiques des ministères de l'Environnement du Québec et du Canada. Ensuite, faire une grille-synthèse de toute l'information nécessaire pouvant contribuer de façon claire et précise à la prédiction des feux de foudre. Pour cela, il serait primordial de travailler à une plus grande échelle, ceci nous permettant d'accumuler beaucoup plus d'informations sur chacun des paramètres en question. Évidemment, ce travail de synthèse nécessiterait beaucoup d'énergie et de temps, mais serait probablement d'une grande utilité aux organismes qui visent à protéger d'une façon ou d'une autre les forêts du Québec boréal.

RÉFÉRENCES

- AVRAMTCHEV, L. 1985. Carte géologique du Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec.
- BEAUBIEN, J. et SIMARD, G. 1993. Méthodologie de classification des données AVHRR pour la surveillance du couvert végétal. 16e symposium canadien sur la télédétection. pp. 597-601.
- BELWARD, A.-S., Kennedy, P.-J., and GRÉGOIRE, J.-M. 1993. The limitations and potential of AVHRR GAC data for continental scale fire studies. *International Journal of Remote Sensing*. In press.
- BONN, F. et ROCHON, G. 1993. Précis de télédétection, volume 1. Presses de l'université du Québec. Québec. 485 p.
- CARRIER, A. Comparaison des indices de végétation "NDVI" et "GEMI". Rapport de stage. Université du Québec à Chicoutimi. 22 p.
- CHISHOLM, W.-A. 1992. Mesures de la densité des coups de foudre au sol, au Canada, 1er mars 1984 au 31 décembre 1991. Association Canadienne de l'Électricité, Division recherche et développement. Toronto. 116 p.
- CHUNG, Y.-S. et LE, H.-V. 1984. Detection of forest-fire smoke plumes by satellite imagery. *Atmospheric Environment*, vol. 18, no 10: 2143-2151.
- CHUVIECO, E. and MARTIN, M. 1994. Global fire monitoring and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 60, no 5: 563-570.
- FLANNIGAN, M.-D. and VONDER HAAR, T.-H. 1986. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. pp. 975-982.
- FLANNIGAN, M.-D. and WOTTON, B.-M. 1991. Lightning-ignited forest fires in northwestern Ontario. Forestry Canada, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. pp. 277-287.
- FLASS, P., and VERSTRAETE M.-M. 1993. Monitoring the environment with vegetation indices: Comparison of NDVI and GEMI using AVHRR data over Africa. VITO-UIA symposium on vegetation, modelling and climate change, February 1993, Belgium. Institute for Remote Sensing Applications. Ispra, Italy. pp. 47-67.

- FREDERIKSEN, P., LANGAS, S. and MBAYE, M. 1990. NOAA-AVHRR and GIS-Based Monitoring of fire activity in Senegal- a provisional methodology and potential applications. *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global*, vol. 84: 400-417.
- GILBERT, D.-E., JOHNSONS, B.-R. and ZALA, C. 1987. A reliability study of lightning locating network in British Columbia. *Canadian Journal of Forestry Research*, vol. 17: 1060-1065.
- GRENON, A. et COULOMBE, A. 1992. Image du Québec par satellite. Centre de télédétection du Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec. 21 p.
- GUILLOT, B. 1981. Les satellites de l'environnement: la série NOAA. Office de la recherche scientifique et technologique outre-mer. Paris. 17 p.
- HEINSELMAN, M.-L. 1973. Fire in the virgin forests of the boundary waters Canoe area, Minnesota. *Quaternary Research*, vol. 3: 329-382.
- HIGGINS, D.-C. et RAMSEY, G.-S. 1992. Statistiques sur les incendies de forêt au Canada: 1988-1990. Forêts Canada. Institut forestier national de Petawawa. 76 p.
- JOHANNSEN, C.-J. and SANDERS, J. 1982. Remote sensing for resource management. *Sail Conservation Society of America*. Ankeny, Iowa. 32 p.
- JURDAN, M. et DUCRUC, J.-P. 1980. Carte écologique du territoire de la Baie de James, districts écologiques et géomorphologie. *Environnement Canada*. 26 p.
- KAUFMAN, Y.-J., SETZER, A., JUSTICE, C., TUCKER, C.-J. and PEREIRA, M.-C. 1990. Remote sensing of biomass burning in the tropics. *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global*, vol. 84: 371-397.
- KOURTZ, P. An experimental system to predict hourly forest fire occurrence and to assist in aerial detection route planning. Forêts Canada. Institut forestier national de Petawawa. 38 p.
- KOURTZ, P. 1973. A forest fire detection demand model for scheduling and routing of airborne detection patrols. *Forest Fire Research Institute*, Ottawa. 34 p.
- KOURTZ, P., NOSAKI, S., O'REGAN and WILLIAM, G. 1977. Forest fires in the computer - A model to predict the perimeter location of a forest fire. Forêts Canada. Institut forestier national de Petawawa. 26 p.
- KOURTZ, P. et TODD, B. 1993. Prédiction quotidienne des incendies de forêt causés par la foudre. Institut forestier national de Petawawa, Forêts Canada. 19 p.
- LAFRAMBOISE, P. 1982. Les feux de forêt dans le territoire de la Baie James: aspects d'environnement et d'aménagement. *Société de Développement de la Baie de James*. 123 p.

- LANDRY, B., MERCIER, M. 1984. Notions de géologie. Modulo Éditeur. 437 p.
- MALINGREAU, J.-P. 1990. The contribution of remote sensing to the global monitoring of fires in tropical and subtropical ecosystems. *Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global*, vol. 84: 338-370.
- MALINGREAU, J.-P., STEPHENS, G. and FELLOWS, L. 1985. Remote sensing of forest fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio*, vol. 14, no 6: 314-321.
- MATSON, M. and HOLBEN, B. 1986. Satellite detection of tropical burning in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, no 3: 509-516.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE, MINES ET RESSOURCES DU CANADA .1992 . Carte: Image Satellite du Canada. Atlas national du Canada.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE, MINES ET RESSOURCES DU CANADA . 1992. Carte: Couverture Végétale du Canada. Atlas national du Canada.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU CANADA. 1990. Canada large fires map (1980-1989).
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, Direction de la conservation des forêts. 1995. Carte des zones à risque de feux de forêt par la foudre: 1977-1992.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, Direction des relations publiques. Ressources et industrie forestières, portrait statistique, édition 1984, 1990, 1993 et 1994.
- LOPEZ, S., GONZALES, R., LLOP, R. and CUEVAS, J.-M. 1991. An evaluation of the utility of NOAA AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing*, vol. 12, no 9: 1841-1851.
- PINTY, B., LEPIEUR, C. and VESRTRAETE, M.-M. 1993. Towards a quantitative interpretation of vegetation indices, part 1 : Biophysical canopy properties and classical Indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 7: 127-150.
- PROULX, H., JACQUES, G., LAMOTHE, A.-M. et LITYNSKI, J. 1987. Climatologie du Québec méridional. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Direction de la Météorologie. Québec. 197 p.
- RIVERIN, S. 1994. Dynamique d'installation de la régénération dans une pessière ouverte à cladonie localisée dans la zone de la pessière noire fermée Nord du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi. 66 p.
- SAUCIER, J.-P. 1991. Carte des zones de végétation au Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Québec.

- SAUCIER, J.-P. et ROBITAILLE, A. 1995. Les unités et les aires écophysiographiques: paysages régionaux du Québec méridional. Ministère des Ressources naturelles du Québec.
- THIBAUT, M. 1985. Carte des régions écologiques du Québec méridional, deuxième approximation. Ministère des Ressources naturelles du Québec.
- TODD, B. et KOURTZ, P.-H. 1992, Prédiction quotidienne des incendies de forêts causés par négligence. Institut forestier national de Petawawa. Forêts Canada. 20 p.
- VAN WAGNER, C.-E. 1978. Age-class distribution and the forest fire cycle. *Canadian Journal Forestry Research*, vol. 8: 220-227.
- VAN WAGNER, C.-E. 1987. Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. Institut forestier national de Petawawa. Forêts Canada. 34 p.
- WEIN, R.-W. and MACLEAN, D.-A. 1983. The role of fire in northern circumpolar ecosystems. John Wiley & Son Editor. pp. 201-217.

ANNEXE 1

a) Liste des 17 points de contrôle utilisés : de la pire à la meilleure valeur résiduelle

Points de contrôle	Localisation (Longitude/Latitude)	Valeur résiduelle (Pixel)
4	66° 18' 00" O, 48° 04' 42" N	5,88 , -0,20
9	75° 32' 40" O, 49° 12' 39" N	4,53 , 1,56
11	61° 42' 51" O, 49° 05' 09" N	-4,60 , 0,34
17	70° 51' 34" O, 48° 19' 30" N	-3,53 , 0,08
12	68° 28' 20" O, 49° 03' 13" N	-2,98 , 1,25
10	76° 54' 40" O, 49° 46' 17" N	2,20 , -2,02
2	61° 48' 00" O, 50° 06' 13" N	2,65 , -0,11
3	66° 24' 25" O, 50° 05' 54" N	2,53 , -0,71
6	79° 22' 56" O, 52° 15' 00" N	-1,80 , 0,64
8	80° 25' 30" O, 50° 13' 56" N	-1,70 , 0,26
5	72° 20' 25" O, 48° 27' 12" N	-1,52 , -0,19
16	79° 56' 22" O, 53° 04' 17" N	1,34 , -0,37
15	72° 07' 57" O, 48° 28' 11" N	-1,23 , -0,05
13	68° 49' 34" O, 48° 21' 51" N	-1,08 , -0,51
7	79° 22' 56" O, 52° 15' 00" N	-1,18 , 0,16
1	61° 42' 51" O, 49° 05' 09" N	0,83 , -0,19
14	64° 56' 28" O, 52° 31' 36" N	-0,34 , 0,04
		RMS = 4.32 , 1.18

Source : Image du Québec par satellite, ministère des Ressources naturelles, Québec

ANNEXE 1 (suite)

b) Points de contrôle avec les deux pires points en moins

Points de contrôle	Localisation (Longitude/Latitude)	Valeur résiduelle (pixels)
9	75° 32' 40" O, 49° 12' 39" N	1.70 , 1.85
10	76° 54' 40" O, 49° 46' 17" N	-1.13 , -1.56
17	70° 51' 34" O, 48° 19' 30" N	-1.88 , 0.17
13	68° 49' 34" O, 48° 21' 51" N	1.49 , -0.50
3	66° 24' 25" O, 50° 05' 54" N	-1.09 , -0.13
11	61° 42' 51" O, 49° 05' 09" N	-0.95 , -0.20
1	61° 42' 51" O, 49° 05' 09" N	0.81 , 0.39
5	72° 20' 25" O, 48° 27' 12" N	0.43 , -0.64
2	61° 48' 00" O, 50° 06' 13" N	0.74 , 0.01
6	79° 22' 56" O, 52° 15' 00" N	0.10 , 0.57
7	79° 22' 56" O, 52° 15' 00" N	0.49 , -0.12
12	68° 28' 20" O, 49° 03' 13" N	-0.10 , 0.45
15	72° 07' 57" O, 48° 28' 11" N	-0.43 , -0.05
16	79° 56' 22" O, 53° 04' 17" N	-0.04 , -0.29
14	64° 56' 28" O, 52° 31' 36" N	-0.15 , 0.06
		RMS = 1.67 , 1.22

Source : Image du Québec par satellite, ministère des Ressources naturelles, Québec

ANNEXE 2 : LISTE ET DESCRIPTION DES RÉGIONS ÉCOLOGIQUES

Zone mélangée :**5e Basse Laurentides du Saguenay :**

Disparition presque totale des érablières

6a Plaine du lac Saint-Jean :

Pinède grise et tremblaie sur stations sèches

6b Basses-terres du Haut-Saguenay :

Tremblaie à érable rouge sur stations sèches et présence occasionnelle de pinède blanche

7a1 Basses-terres du lac Simard :

Frênaie noire sur stations hydriques et tremblaie fréquente

7b Hautes-terres du lac Camachigama :

Disparition des érablières et groupements de transition dominés par les bétulaies blanches

Zones boréale :**8c1 Basses-terres d'Amos :**

Tremblaie et bétulaie blanche importantes parmi les forêts secondaires

8c2 Haut Saint-Maurice :

Pinède grise sur stations sèches; tremblaie beaucoup moins fréquente que dans la région 8c1

8e Basses Laurentides de la rivière Métabetchouan :

Bétulaie blanche ou tremblaie après feu ou coupe, disparition de la pinède grise.
Tremblaie située surtout dans les vallées

8f Moyennes Laurentides de la rivière Jacques-Cartier :

Forêt secondaire après feu ou coupe dominée par le bouleau blanc

8g Basses-terres et collines de Baie-Comeau :

Érablières rouges et pin blanc sur les stations sèches. Forêt secondaire dominée par le bouleau blanc sur les collines et par le bouleau blanc et le peuplier faux-tremble dans les basses-terres

8h Basses collines de la rivière Ashuapmushuan :

Après feu, forêt secondaire dominée par le peuplier faux-tremble sur sols frais et par le pin gris sur sols secs

8i Hautes collines de la rivière Trenche :

Après feu, forêt secondaire dominée par le bouleau blanc ou le peuplier faux-tremble sur sols frais et par le pin gris sur sols secs

8j Hautes-terres du lac Bouchette :

Forêt secondaire dominée par les tremblaies et pessières noires à sapin sur sols frais et par le pin gris sur sols secs

8l Rivière Betsiamites :

Forêt secondaire dominée par le bouleau blanc sur les hautes-terres et par le bouleau blanc ou le peuplier faux-tremble dans les vallées. Présence occasionnelle de pinède grise sur les platières sableuses

9d Sommets du lac Marceau :

Présence de forêt rabougrie et de krummholz sur certains sommets de la région; également pessière noire à sapin et mousses sur stations mésiques et sapin plus fréquent que dans la région 11a de l'étage altitudinal inférieur

9e Lac Poincaré :

Forêt rabougrie sur les plus hauts sommets. Végétation semblable à celle de la région 9d

9f Havre-Saint-Pierre :

Pessière noire à mousses et pessière noire à sapin comme principaux groupements avec la sapinière à épinette noire

10b Baie de Rupert :

Pessière blanche à sapin ou pessière noire à mousses sur les stations mésiques

11a Rivière Tulnustouc :

Sapinière sur les stations les plus riches; forêt feuillue dominée par le bouleau blanc; peuplier faux-tremble plutôt rare et localisé dans les vallées aux plus basses altitudes; présence occasionnelle de pin gris sur les platières sableuses

11b Rivière Olomane :

Végétation semblable à celle de la région 11a, mais sapin plus fréquent et disparition des pinèdes grises

11c Sommets du lac Caopacho :

Forêt plus claire que dans la région 9d et sapin plus fréquent que dans la région 12e; formations rabougries vers certains sommets

12a Lac Matagami :

Groupements de transition dominés par le pin gris et le peuplier faux-tremble sur les stations mésiques; sapinière et bétulaie blanche sur les stations plus riches et bien drainées

12b Lac Chibougamau :

Groupements de transition dominés par le peuplier faux-tremble sur les stations mésiques et le bouleau blanc sur les stations plus riches. Sapinière et bétulaie blanche plus importantes que dans la région 12a mais tremblaie moins fréquente

12c Lac Evans :

Groupements de transition dominés par le pin gris sur les stations mésiques.

Tremblaie, bétulaie et sapinière sur les stations plus riches, la première nettement moins fréquente que dans les régions 12a et 12b

12d Lac Misatassini :

Groupements de transition dominés par le pin gris sur les stations mésiques. Sites plus riches colonisés par les sapinières, les bétulaies et les tremblaies; sapin plus abondant que dans la région 12c et dorénavant de plus en plus fréquent vers l'est

12e Lac Fleur-de-May :

La pessière noire à mousses est remplacée par la pessière noire à sapin et mousses et occasionnellement par la sapinière à épinette noire sur les stations les plus riches. Plus rarement, présence de pin gris sur platières sableuses

12f Lac Fonteneau :

Végétation semblable à celle de la région 12e, mais sapin plus fréquent

12g Eagle River :

Au climax, s'ajoute la pessière noire à sapine, plus rarement, la sapinière à épinette noire; elles reflètent un climat plus humide que dans la région 12h

Toundra alpine :**13b Mont-Jacques-Cartier :**

Landes arbustives, prairies et krummholz

Source : Les régions écologiques du Québec méridional. 1985. Ministère des Ressources naturelles, Québec.

