

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
CLAUDINE OUELLET

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS D'INONDATION À L'EMBOUCHURE DE
LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS EN LIEN AVEC LES VARIATIONS
CLIMATIQUES ET LES MODIFICATIONS ANTHROPIQUES

JUIN 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

AVANT-PROPOS

En vertu du règlement des études de cycles supérieurs, le présent document a été rédigé sous forme d'article scientifique. Il contient deux chapitres dont le premier est une introduction générale au projet et le second est l'article qui sera soumis à une revue.

Le premier chapitre du mémoire résume les grandes lignes du projet en y intégrant une revue de la littérature, une description de la zone d'étude, la problématique, les objectifs et hypothèses, les méthodologies et les résultats.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de recherche, la Dre Diane Saint-Laurent pour m'avoir guidée dans ce projet. Je ne peux passer sous silence son soutien, sa confiance et ses nombreux conseils tout au long de ces années autant sur le plan professionnel que personnel. Je remercie également le Dr Denis Leroux et la Dre France Normand qui ont généreusement accepté de faire partie du comité d'orientation et de révision du mémoire. Ils ont été un soutien important dans deux aspects de ce projet soit les SIG pour le Dr Leroux et l'aspect historique pour la Dre Normand.

Je remercie aussi tous les gens que j'ai pu côtoyer tout au long de ces années à l'université que ce soit les professeurs et les étudiants autant du département de géographie que de biologie. Ils ont tous contribué à faire de ce séjour universitaire une expérience enrichissante.

Également, ma famille ne pourrait être oubliée, car ils ont tous été un appui important autant au niveau financier que moral. Ils ont su m'inculquer de bonnes valeurs et une fierté me permettant de mener à bien ce projet jusqu'à la fin.

Finalement, la personne que je ne peux absolument pas oublier est mon conjoint Philippe. C'est grâce à lui que je peux dire mission accomplie. Il a su me motiver, me soutenir et surtout être à mes côtés depuis douze ans, ce qui ne fut pas une mince tâche.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel des changements climatiques et de la transformation du territoire par les activités humaines, il devient intéressant de quantifier ces changements et leurs effets sur une échelle de longue durée telle l'échelle séculaire. Dans la région de l'embouchure de la rivière Saint-François, les inondations printanières causées par la formation d'embâcles ont toujours été un problème pour les résidents du secteur. L'implantation des opérations de déglacage à partir de 1976 a permis de contrer la formation de ces embâcles de glaces caractéristiques du secteur et ainsi réduire les risques d'inondations durant la saison. Par contre, la région connaît toujours des inondations qui surviennent surtout à l'hiver suivant des redoux inhabituels des températures. Dans le cadre de ce projet, il nous est apparu pertinent d'évaluer les variations dans la récurrence des crues et des inondations par les données climatologiques ainsi que des modifications de l'occupation du territoire. Dans un premier temps, la recension des événements d'inondation dans la région d'étude a permis d'établir une chronologie des faits pour la période de 1865 à 2005 et d'identifier des périodes charnières. Par la suite, l'analyse des données climatologiques a permis de déterminer les facteurs climatiques caractérisant les périodes identifiées plus tôt. Finalement, l'analyse de l'évolution de l'occupation du territoire au cours des décennies a permis d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur la récurrence des inondations. D'ailleurs, les modifications d'affectations du sol influencent le régime d'écoulement par la présence d'une couverture végétale ou de surface avec un fort pouvoir de ruissellement, pouvant atténuer ou contribuer aux inondations. La méthodologie utilisée pour cette analyse s'amorce par la recension dans les divers documents d'archives des événements d'inondation répertoriés. Également, l'analyse des données climatologiques a mis en évidence les variables explicatives influençant la récurrence des inondations. Finalement, l'acquisition des données cartographiques et l'utilisation des SIG ont permis de faire ressortir par exemple les modes d'occupations du territoire et comparer les modifications du territoire entre les années d'étude sélectionnées. Cette étude a démontré une augmentation des inondations depuis les années 75, et ce, malgré l'implantation des opérations de déglacage. À la lumière des analyses des données climatiques, nous pouvons affirmer que cette augmentation des inondations est provoquée par des redoux durant l'hiver soit en dehors de la période d'action de la garde côtière. Pareillement, les changements d'occupation du territoire ne permettent pas de réduire le ruissellement, car malgré une reforestation importante, elle ne s'est pas effectuée en bordure des berges.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
CHAPITRE 1	1
1.1. Introduction.....	1
1.2. Problématique	3
1.3. Zone d'étude	4
1.3.1. Description générale	4
1.3.2. Climat et flore.....	5
1.3.3. Hydrographie	5
1.3.4. Histoire de la zone d'étude	6
1.4. Revue de la littérature	6
1.4.1. Méthodes de reconstitution chronologique des inondations.....	7
1.4.2. Impacts des changements climatiques	8
1.4.3. Dynamique fluviale en région nordique	9
1.4.4. Impacts de l'aménagement du territoire	11
1.5. Objectifs de la recherche.....	12
1.6. Méthodologie	13
1.6.1. Acquisition des données	13
1.6.2. Géoréférencement et mosaïques	15

1.6.3.	Cartographie	16
1.6.4.	Analyses statistiques des données	17
1.7.	Résultats	18
1.7.1.	Anomalies climatiques.....	18
1.7.2.	Événements d'inondation	19
1.7.3.	Occupation du territoire.....	19
1.8.	Conclusion	21
BIBLIOGRAPHIE		24
CHAPITRE 2		37
RÉSUMÉ.....		38
ABSTRACT		38
2.1.	Introduction.....	39
2.2.	Matériels et Méthodes	41
2.2.1.	Description de la zone d'étude	41
2.2.2.	Évènements d'inondation	43
2.2.3.	Données climatiques	44
2.2.4.	Données cartographiques.....	44
2.2.4.1.	Géoréférencement	45
2.2.4.2.	Mosaïques.....	46
2.2.4.3.	Polygones	46
2.2.5.	Analyses statistiques.....	47
2.3.	Résultats	48
2.3.1.	Recension des évènements d'inondation	48
2.3.2.	Variabilité climatique	49
2.3.3.	Caractérisation de l'occupation du territoire	49
2.4.	Discussion	50

2.4.1. Recension des évènements d'inondation	50
2.4.2. Variabilité climatique	52
2.4.3. Modifications de l'occupation du territoire	53
2.5. Conclusion	55
REMERCIEMENTS	58
BIBLIOGRAPHIE	59
ANNEXE A	77
ANNEXE B.....	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Coefficients de détermination et valeurs de p des régressions pour les différentes variables climatiques pour la modélisation de la station de Pierreville à partir des stations voisines	31
1.2 Analyse de tendance des mois d'hiver et du printemps pour les variables de température minimum et de précipitation totale dans la zone d'étude. Les valeurs en gras étant significatives.	35
2.1 Coefficients de détermination et valeurs de p des régressions pour les différentes variables climatiques pour la modélisation de la station de Pierreville à partir des stations voisines	64
2.2 Erreur RMS obtenu lors du géoréférencement des photographies aériennes de 1928, 1964 et 1979.....	65
2.3 Analyse de tendance des mois d'hiver et du printemps pour les variables de température minimum et précipitation totale dans la zone d'étude. Les valeurs en gras étant significatives.....	69

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
1.1 «Suite du gouvernement des Trois Rivieres qui comptent en descendant le fleuve St Laurent depuis les isles de Richelieu jusqu'à la sortie du lac St Pierre» (Tiré de Catalogne et al., 1921).....	29
1.2 Délimitation de la zone d'étude à l'embouchure de la rivière Saint-François	30
1.3 Anomalies des précipitations totales pour la station de Drummondville selon la normale climatique de 1970-2000 (Tiré de Saint-Laurent <i>et al.</i> , 2009)	32
1.4 Fréquences relatives des inondations entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Division de la série chronologique en deux groupes.	33
1.5 Fréquence relative des inondations par mois entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude	34
1.6 Pourcentage de superficies couvertes selon trois catégories (agricole, forestier et urbain). Le pourcentage dans la légende indique le taux de variation des superficies entre 1928 et 2005	36
2.1 Délimitation de la zone d'étude à l'embouchure de la rivière Saint-François	63
2.2 Fréquence relative des inondations entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Résultat du test de Chi-carré pour les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005).....	66
2.3 Fréquence relative des inondations par mois entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude pour les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005).....	67
2.4 Fréquence relative des inondations pour l'hiver et le printemps entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Résultats du test de Chi-carré pour l'hiver et le printemps selon les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005)	68
2.5 Pourcentage de superficies couvertes selon trois catégories (agricole, forestier, urbain). Les valeurs dans la légende indique la variation des superficies entre 1928 et 2005	70

2.6	Évolution des superficies agricoles entre 1964 et 2005	71
2.7	Évolution des superficies forestières entre 1964 et 2005.....	72
2.8	Évolution des superficies urbaines entre 1964 et 2005.....	73
2.9	Propagation d'une onde de crue lors d'une averse après l'urbanisation d'un territoire (Tiré de Simard, 1999).....	74
2.10	Simulated flood-frequency curves (m ³ /sec-1) for Maplewood Creek. Flood-frequency curves indicate the annual flood discharge rates for 1991 and 1998 exceed presettlement discharge rates (Tiré de Wissmar et al., 2004).....	75
2.11	Normalized flows (m yr-1) as fonction of the forest canopy cover (percent of watershed area) during 1991 and 1998. Flows and forest cover for urban and rural watersheds in the lower Cedar River (Tiré de Wissmar et al., 2004).....	76

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Introduction

Au cours des dernières années, les changements climatiques et leurs impacts sur l'environnement et les activités humaines sont devenus l'objet de préoccupations, tant pour la communauté scientifique, les gouvernements que pour le public en général. La publication du quatrième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat montre de façon évidente que les changements climatiques auront non seulement des impacts environnementaux majeurs, mais aussi des incidences économiques relativement lourdes à l'échelle mondiale (Pachauri *et al.*, 2008). Le rapport du GIEC, déposé au début de l'année 2007, révèle plusieurs évidences scientifiques indiquant qu'il y a non seulement un changement climatique à l'échelle planétaire, mais que ce changement connaît une accélération depuis la révolution industrielle (Pachauri *et al.*, 2008). Ces changements climatiques entraînent des événements climatologiques extrêmes qui sont également plus fréquents qu'auparavant pour certaines régions du monde (Pachauri *et al.*, 2008). Des exemples comme la fameuse canicule en Europe en 2003, l'ouragan Katrina en 2005 et de nombreuses inondations dans l'Asie en 2007, ont été enregistrés comme des événements hors de l'ordinaire et qui marquent la mémoire collective des populations affectées (Magdelaine, 2001).

Au Québec, les phénomènes météorologiques extrêmes auraient connu, semble-t-il, une certaine augmentation. Nous n'avons qu'à penser aux cas des pluies abondantes de 1996 (cf. déluge du Saguenay), ou la tempête de verglas de 1998 qui a touché une bonne partie de la Montérégie, couramment appelé le « triangle noir » (Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, 1997; Perrier *et al.*, 1999). Cette augmentation relative des phénomènes climatiques exceptionnels a amené les chercheurs

de divers domaines à étudier l'évolution du climat. En faisant une revue du climat passé, notamment par la cryologie, la géologie et la dendrochronologie, les chercheurs tentent d'évaluer cette évolution sur plus d'un siècle et même davantage. D'autres s'efforcent d'estimer les événements futurs à l'aide des modèles climatiques. Notamment, le modèle de circulation générale (MCG) basé sur le doublement du CO² et qui a été utilisé pour la prévision du climat québécois dans l'étude de Bergeron (1997) sur les changements climatiques. Ce dernier rapport fait d'ailleurs une mise en garde des risques d'une augmentation des événements extrêmes, dont une hausse de la fréquence des inondations.

Faisant partie de la grande région de l'Estrie et souvent identifié comme ayant une problématique d'inondations récurrentes, le bassin versant de la rivière Saint-François est touché régulièrement par ce phénomène naturel. Les inondations se produisent principalement au printemps lors de la fonte du couvert de neige. Cette saison est également associée à des épisodes de précipitations souvent abondantes. La combinaison de ces deux éléments entraîne une forte crue du cours d'eau qui finit par inonder les rives. Notre secteur d'étude, qui couvre une large portion de l'embouchure de la rivière Saint-François, est aussi touché par des inondations. Les villages de Pierreville, Notre-Dame-de-Pierreville et de Saint-François-du-Lac sont régulièrement affectés par les crues. On y retrouve également des éléments contribuant à la formation d'embâcle de glace, soit une géomorphologie de la rivière offrant un élargissement ainsi qu'un pont à la hauteur de la municipalité de Pierreville. De plus, notre secteur d'étude est localisé dans la zone de confluence avec le lac Saint-Pierre qui lui aussi, est soumis à de fréquentes remontées des eaux au printemps. Ces éléments favorisent un ralentissement du débit, ce qui entraîne la formation des embâcles de glace qui occasionnent des inondations en amont du bouchon de glace. D'ailleurs, la garde côtière a ciblé ce secteur et d'autres aussi, comme des secteurs prioritaires pour l'instauration de mesures d'atténuation afin de réduire les coûts associés aux inondations. Depuis les années soixante, des opérations de déglçage printanières ont été mise en place/œuvre pour les rivières connaissant un problème récurrent d'embâcle de glace, comme c'est le cas pour

la rivière Saint-François. Il reste néanmoins que cette problématique des inondations ne date pas d'hier et continue de toucher la population riveraine malgré l'instauration de nombreuses mesures pour contrer ce problème, dont celles de l'implantation de barrages pour le contrôle des crues, des politiques d'aménagement urbain et les opérations de déglacage.

1.2. Problématique

L'occupation des rives à l'embouchure de la rivière Saint-François remonte à loin, si l'on en juge par la carte d'époque (figure 1.1) de l'arpenteur-cartographe Gédéon de Catalogne¹, disponible à la Bibliothèque et Archives nationales du Québec (Catalogne *et al.*, 1921). Sur cette carte du début du XVIII^e siècle qui montre le lac Saint-Pierre et l'embouchure de la rivière Saint-François, on peut voir des terres loties et possiblement labourées. L'attrait pour les emplacements riverains avait un aspect pratique à cette époque, car le transport se faisait principalement par bateau. Aujourd'hui, les motivations sont beaucoup plus de l'ordre de l'esthétique du paysage. Malgré cela, cette occupation des bandes riveraines suppose aussi l'occupation des plaines d'inondation de la rivière et, par le fait même, l'augmentation du risque d'être victime d'inondations périodiques. En raison très probablement de la fertilité des terres qu'entraînaient les crues saisonnières, ceci pourrait expliquer la présence de ces terres cultivées à cet endroit, depuis l'origine de la colonie.

Enfin, suivant les considérations actuelles des risques d'inondation, on note la mise en place de diverses mesures ou politiques gouvernementales qui tentent de trouver maintes solutions afin de réduire les risques pour les riverains, qui encore aujourd'hui sont toujours aussi nombreux à s'approprier ces milieux riverains. Certaines de ces mesures

¹ Il était un arpenteur, cartographe et officier français, né en 1662 à Arthez, dans le Béarn.

² Selon l'information fournie par Capt. Steven D. Neatt, B.Sc., M.M. Superintendant Déglacage, escorte et contrôle des inondations, Pêches et Océans Canada, Garde côtière canadienne, région de Québec

existent depuis plusieurs décennies, par exemple, l'implantation des barrages en amont des zones inondables, des politiques d'aménagement et de protection des rives ainsi que des opérations de déglacement au printemps. Même si des mesures d'atténuation ont été instaurées, les inondations demeurent un problème coûteux pour les divers paliers gouvernementaux qui tentent de réduire les risques au maximum pour la population. Mais avec la pression démographique dans certains secteurs ainsi que la recrudescence des inondations dans d'autres régions, il est nécessaire d'identifier clairement la problématique de ces événements d'inondations et d'adopter des solutions. Également, toute la problématique des changements climatiques présents et futurs vient contribuer au besoin de connaissance de ce phénomène. On peut se questionner sur les facteurs qui modifient les occurrences de ces événements d'inondation et comment ils interviennent dans cette dynamique.

1.3. Zone d'étude

1.3.1. Description générale

Le bassin versant de la rivière Saint-François couvre un territoire de 10 230 km² sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et traverse trois régions administratives, soit l'Estrie, la Chaudière-Appalaches et le Centre-du-Québec dans des proportions respectives de 80 %, 9 % et 11 % (COGESAF, 2006). Il faut noter que 14 % du bassin versant (portion sud) se trouve aux États-Unis dans l'état du Vermont. Pour notre recherche, l'analyse porte plus spécifiquement sur l'embouchure de la rivière Saint-François, depuis Pierreville et couvre une superficie totale de 59.5 km² (figure 1.2). Elle fait partie de la région physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent (Gélinas et Direction générale des eaux, 1977). Le relief de cette région est caractérisé par une topographie plane variant entre 0 et 60 mètres d'altitude dans la plaine du Saint-Laurent, et atteint

150 mètres vers le plateau appalachien (Primeau et Direction de la qualité des cours d'eau, 1992).

1.3.2. Climat et flore

Le climat est qualifié de continental humide avec un été chaud et un hiver froid. Il permet ainsi une longue saison de croissance végétale. On y observe des températures annuelles moyennes variant entre 4.2 et 5.8 °C et les précipitations moyennes annuelles varient entre 989 et 998 mm par année (COGESAF, 2006). La période de gel de la région physiographique du bassin de la rivière Saint-François se situe entre le 5 et le 13 décembre, tandis que la période de débâcle survient entre le 31 mars et le 10 avril (Bergeron et Direction générale des eaux, 1977). La zone de végétation que l'on trouve dans l'ensemble du bassin est qualifiée de tempérée nordique dans la sous-zone de forêt décidue. On y trouve trois domaines bioclimatiques soit, l'érablière à bouleau jaune, l'érablière à caryer cordiforme et l'érablière à tilleul, dont les deux derniers domaines sont présents à l'embouchure de la rivière. L'ensemble du bassin est caractérisé par une grande diversité de sa flore dont plusieurs espèces atteignent leur limite septentrionale de distribution (COGESAF, 2006).

1.3.3. Hydrographie

La rivière Saint-François prend sa source dans le lac Saint-François, mais plusieurs cours d'eau viennent l'alimenter. Le bassin versant de la rivière Saint-François est divisé en vingt-quatre sous-bassins, lesquels drainent des superficies minimales et maximales entre 41 km² et 1 965 km². La zone d'étude se situe à l'embouchure de la rivière Saint-François et la superficie de drainage équivaut à environ 10 230 km².

Il est important de définir le type de régime d'écoulement de la rivière Saint-François afin de comprendre les processus ou phénomènes des crues et des inondations qui s'y produisent. Le régime hydrologique des rivières du Québec est qualifié de nivo-pluvial. Selon Giret (2007), l'écoulement comporte deux périodes de basses eaux (hiver et été), séparées par deux maxima (printemps et automne). Le maximum du printemps étant le plus important et est causé naturellement par la fonte du couvert de neige.

1.3.4. Histoire de la zone d'étude

Tel que mentionné précédemment, l'occupation des rives de la rivière Saint-François remonte aussi loin que le début de la colonisation de la Nouvelle-France. L'octroi d'une première seigneurie en 1662, la seigneurie Saint-François-du-Lac, ainsi que de celle de Pierreville en 1683, confirme cette occupation hâtive. D'ailleurs, une carte (figure 1.1) montrant la division des terres a été réalisée par Gédéon de Catalogne, en 1709, illustrant ainsi l'étendue de l'occupation des terres à cette époque (Catalogne *et al.*, 1921). Les premiers habitants demeurent essentiellement dans les Basses-terres du Saint-Laurent, l'amont du bassin de la rivière Saint-François n'ayant été colonisé qu'après la guerre d'Indépendance américaine par les loyalistes en 1775-1783. La principale activité économique du secteur aval du bassin est l'agriculture, bien qu'une scierie ait été en fonction sur l'île du Fort entre 1888 et 1906.

1.4. Revue de la littérature

Les différentes instances gouvernementales tentent de prévoir et de développer des méthodes de protection pour la population contre les inondations printanières qui sont les plus fréquentes. Mais il est important de comprendre les causes de ces inondations afin d'intervenir avec efficacité. C'est pourquoi plusieurs chercheurs tentent d'identifier

les causes précises et de cibler les impacts de ces événements, que ce soit par leurs séquences d'occurrence, ou en tenant compte des modifications anthropiques survenues sur le territoire et la morphologie fluviale.

1.4.1. Méthodes de reconstitution chronologique des inondations

L'étude des phénomènes climatiques nécessite une couverture temporelle assez longue afin de pouvoir dégager la tendance générale de son évolution. D'ailleurs, les études sur les changements climatiques se basent non seulement sur les données numériques enregistrées par les nombreuses stations autour du globe, mais aussi sur des données provenant d'échantillons de glace ainsi que des archives terrestres et géohistoriques. L'étude de New *et al.* (2001), portant sur une revue des mesures et tendances climatiques du 20^e siècle à l'échelle du globe, fait ressortir l'importance d'une série chronologique complète pour l'analyse de la variabilité climatique. Les auteurs constatent que l'utilisation seule des données numériques ne permet pas d'obtenir des séries complètes et uniformes pour toutes les régions analysées. Cette situation réduit donc les possibilités d'identifier clairement une tendance générale de l'évolution des précipitations lorsque la période couverte est restreinte. Ils notent aussi que dans la plupart des cas, ces données ne sont relevées de façon systématique que depuis le milieu du siècle dernier soit surtout à partir des années 1950. En outre, on observe des modifications considérables dans les procédures de cueillette de données ou de leur nombre, ce qui entraîne des erreurs importantes pour le traitement. Pour corriger la situation, des études tentent de contrer ces inconvénients en utilisant d'autres sources d'information afin de compléter les séries chronologiques. Plusieurs méthodes ont été proposées afin d'épurer les données pour les phénomènes climatiques comme les inondations. Des chercheurs tels que Livingston (2009), Saint-Laurent *et al.* (2008) et Zielonka (2008) ont utilisé la dendrochronologie, la stratigraphie des sols ainsi que les archives documentaires afin d'obtenir une reconstitution des événements d'inondation.

À titre indicatif, les travaux de Saint-Laurent et Hähni (2008) s'inscrivent dans cette optique de reconstitution chronologique des inondations dans le secteur amont du bassin versant de la rivière Saint-François. Ces études combinent les données historiques pour obtenir une couverture temporelle séculaire, soit jusqu'à 150 ans afin de mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur le régime fluvial.

1.4.2. Impacts des changements climatiques

Comme mentionnés plus tôt, les changements climatiques actuels entraînent une modification générale du climat, et conséquemment affectent de nombreux processus naturels. Aussi, ils agissent sur la fréquence des événements d'ordre hydrologique, notamment sur la récurrence des événements d'inondation. Plusieurs études ont porté sur ces aspects climatiques, dont le rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Pachauri *et al.*, 2008). Ce groupe comprend plusieurs chercheurs et acteurs importants dans le domaine de la recherche sur les changements climatiques qui s'intéressent aux effets des changements climatiques sur les différentes ressources soit environnementales, économiques, et autres. Au Québec ou ailleurs, d'autres chercheurs ont décrit l'évolution du climat à des échelles locale ou régionale (Bonsal et Prowse, 2003; Benito *et al.*, 2004; Mitchell et Jones, 2005; Barriendos et Rodrigo, 2006; Mareuil *et al.*, 2007; Saint-Laurent *et al.*, 2009). Leurs études mettent en lumière l'importance d'utiliser des données sur une période chronologique séculaire, voire millénaire, afin de mieux distinguer les variations climatiques naturelles de celles qui sont d'origine anthropique. D'ailleurs, des études concernant le climat du Canada ont permis d'identifier une variation des tendances générales des températures et des précipitations (Bergeron *et al.*, 1997; Mekis et Hogg, 1999; New *et al.*, 1999; New *et al.*, 2000; Whitfield, 2001; Gagnon *et al.*, 2009). Et plus particulièrement, cette variabilité se définit par une augmentation des précipitations dans certaines régions qui se traduit par une plus grande occurrence des événements d'inondation (Bergeron *et al.*, 1997). Avec

la perspective d'une augmentation des températures, certains chercheurs qui étudient plus spécifiquement le régime hydrologique en milieu nordique s'interrogent sur l'impact de ces changements sur le couvert de glace. Notamment, Andrishak et Hicks (2008) ont simulé les effets des changements climatiques pour le couvert de glace en utilisant le modèle canadien climatique global couplé de seconde génération (CGCM2). Ils ont pu quantifier les effets en nombre de jours où l'englacement de la rivière retarde, en comparaison aux données historiques ainsi que du moment de la débâcle qui survient plus tôt. Également, la perspective d'un réchauffement inattendu des températures durant les mois de janvier et février peut entraîner une fusion partielle de la couverture de glace pouvant ainsi conduire à la création d'embâcles en rivière et générer des risques d'inondations. Cette situation est d'autant plus vraie dans les zones plus propices aux embâcles comme autour des ponts ou dans les zones de rétrécissement des rivières, ainsi que dans les sections où il y a une diminution du débit d'eau.

1.4.3. Dynamique fluviale en région nordique

Comme nous l'avons vu, le régime hydrologique du Québec est qualifié de nivo-pluvial, donc régi par la fonte du couvert neigeux au printemps ainsi que par des épisodes de pluie plus importants au printemps et à l'automne (Giret, 2007). L'apport soudain d'eau à la rivière au printemps qui occasionne le plus souvent une crue rapide se fait par ses affluents, mais aussi par le ruissellement de surface, l'écoulement oblique et l'écoulement à partir des nappes phréatiques (Leopold, 1994). Selon différents facteurs comme la saturation du sol, l'imperméabilisation des surfaces, la durée des précipitations ainsi que la quantité d'eau, la crue peut être assez importante pour occasionner une inondation.

Pour notre part, la cause principale des inondations à l'embouchure de la rivière Saint-François réside dans la formation d'embâcle de glace. Ce sont les rivières au sud du fleuve Saint-Laurent qui sont les plus affectées par les embâcles de glace en raison de

leur orientation d'est en ouest. D'ailleurs, Gagnon *et al.* (1970) soulignaient la vulnérabilité des municipalités bordant les rives de la rivière Saint-François à son embouchure à la formation d'embâcle de glace causée par le ralentissement du débit. D'autre part, plusieurs auteurs s'intéressent aux mécanismes de formation du couvert de glace et de la dissolution de ce dernier en milieu fluvial, dont Beltaos et Burrell (2003), Jasek (2003), Andrishak et Hicks (2008), Beltaos (2008), Beltaos et Carter (2009) et Hicks (2009) pour ne nommer que ceux-ci. D'ailleurs, on y décrit que l'hydrodynamique et la géomorphologie du cours d'eau se retrouvent modifiées par la présence notamment du frasil, mais aussi par le couvert de glace proprement dit contribuant à la genèse des inondations en période hivernale et printanière (Hicks, 2009). Beltaos et Burrell (2003) ont effectué une étude de l'impact des changements climatiques sur la débâcle printanière des rivières. Ils ont démontré que le réchauffement de la température entraînait un retard dans la formation du couvert de glace au début de la saison, mais aussi une débâcle hâtive au printemps. En 2006, ils quantifiaient les effets des changements climatiques à l'aide d'un modèle climatique et obtenaient comme résultat une nette diminution de la période d'englacement, soit de l'ordre de 2 à 4 semaines pour le delta Peace-Athabasca. Beltaos (2008) a réalisé une revue exhaustive de l'état actuel des connaissances sur les processus de formation, de la physique, de l'hydrodynamique et des techniques de contrôle des embâcles de glace en rivière. De même, les épisodes de redoux des températures pendant l'hiver peuvent entraîner une fonte partielle du couvert de neige dans le bassin ainsi que des précipitations sous forme liquide entraînant une hausse du débit de la rivière. Cette hausse du débit occasionne souvent une dislocation du couvert de glace, dite mécanique, en amont et se dirigeant vers l'aval. L'accumulation de cette glace à l'embouchure forme ainsi un embâcle favorisant une crue de la rivière jusqu'à ce qu'il y ait inondation si l'embâcle n'est pas éliminé avant (Jasek, 2003).

1.4.4. Impacts de l'aménagement du territoire

L'aménagement du territoire comme l'irrigation des terres agricoles, le drainage du cours d'eau, l'imperméabilisation des sols par l'urbanisation et bien d'autres activités anthropiques peut occasionner des modifications du régime hydrologique et ainsi favoriser ou réduire les événements d'inondation. En particulier depuis la dernière décennie, l'importance du couvert végétal (forestier et agricole) et ses effets sur le régime hydrologique ont fait l'objet de plusieurs études (Bryant et Gilvear, 1999; Chase *et al.*, 2000; Kestens, 2000; Bronstert *et al.*, 2002; Andreassian, 2004; Rey *et al.*, 2004; Wissmar *et al.*, 2004; Camorani *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; Toba et Ohta, 2008). Il a été démontré dans quelle mesure le type de couvert végétal influençait le ruissellement et la réponse hydrologique du cours d'eau vis-à-vis des précipitations importantes. L'étude de Simard (1999), notamment, illustre la différence de la propagation d'une onde de crue lors d'une averse après l'urbanisation d'un territoire. Également, l'étude de Wissmar *et al.* (2004) intègre des variables caractérisant l'utilisation du sol à un modèle hydrologique afin d'évaluer l'impact de ces variables sur le ruissellement. Par ailleurs, l'étude de Rey *et al.* (2004) se veut une revue de l'état des connaissances en ce qui concerne le rôle de la végétation contre l'érosion hydrique de surface. On y constate que non seulement le couvert végétal permet d'intercepter les eaux de pluie, mais que son rendement est tributaire du pourcentage de recouvrement de la couverture végétale, de sa répartition ainsi que du type de végétation (agricole, forestière, etc.). Quant à l'impact de l'urbanisation sur les risques d'inondation, quelques études ont été réalisées au Canada et au Québec (Simard, 1999; Nirupama et Simonovic, 2007; Saint-Laurent et Hahni, 2008). Par contre, peu d'études au Québec se sont penchées sur cet aspect de l'influence des changements de la couverture végétale ou d'utilisation du sol en lien avec l'hydrologie fluviale, même si l'aménagement du territoire a connu des modifications importantes surtout durant le 19^e siècle pour le bassin de la Saint-François, par exemple (Simard, 1999; Saint-Laurent, 2001; Saint-Laurent et Hahni, 2008).

1.5. Objectifs de la recherche

L'objectif général de notre projet de recherche est de dégager des liens entre les changements d'occupation du territoire, les variables climatiques et la chronologie des événements d'inondation à l'embouchure de la rivière Saint-François.

Le premier objectif spécifique consiste à réaliser la recension exhaustive des événements d'inondation et des données climatologiques dans l'aire d'étude et à proximité, depuis 1865 jusqu'à 2005. Cette recension permettra de décrire les événements d'inondation par leur nombre, leur période de récurrence et leur période d'occurrence dans la saison. Avec les changements climatiques, on peut supposer une augmentation des inondations hivernales (décembre, janvier et février) à la suite des épisodes de pluies et de redoux plus fréquents. Il y a aussi une diminution de la fréquence des inondations après les années 70 qui devrait ressortir des recensions documentaires, en raison du déglacement systématique de l'embouchure de la rivière Saint-François depuis 1976². On suppose, à priori, que les changements climatiques et les opérations de déglacement à l'embouchure de la rivière ont une influence marquée sur la fréquence des inondations.

Le second objectif spécifique est la caractérisation des modifications de l'occupation des terres sur une période s'échelonnant de 1928 à 2005. Historiquement, le Québec a connu des périodes d'intensification de son agriculture et, plus récemment, l'urbanisation a gagné la plupart des régions du Québec. Ces changements du mode d'occupation du territoire ont d'ailleurs été quantifiés à plusieurs niveaux d'échelle (Proulx, 2002). Sur notre territoire, on devrait observer la présence de grandes superficies agricoles au début du 19^e siècle, et ce, jusqu'au milieu du 20^e siècle. Pour cette période, une diminution devrait apparaître sur le territoire et, vers la fin des années 1970, elle devrait être plus drastique. Cela correspond à une emprise de l'industrialisation et une perte des

² Selon l'information fournie par Capt. Steven D. Neatt, B.Sc., M.M. Superintendant Déglacement, escorte et contrôle des inondations, Pêches et Océans Canada, Garde côtière canadienne, région de Québec (conversation téléphonique le 9 octobre 2009).

superficiés agricoles au profit de petits espaces boisés (friches agricoles). Également, une augmentation de l'urbanisation devrait apparaître après le milieu du 20^e siècle, mais de façon moins marquée pour cette région plutôt rurale, par rapport à d'autres régions qui ont connu une importante croissance urbaine, notamment Drummondville et Sherbrooke.

1.6. Méthodologie

1.6.1. Acquisition des données

La première étape du projet a été la cueillette des données autant pour la recension des événements d'inondation, que pour les données hydroclimatiques et géographiques, afin de créer une base de données complète. Les événements d'inondation ont été inventoriés à partir des divers documents comme des journaux régionaux (*Le Nouvelliste*, *La Tribune*, *La Gazette de Nicolet*, etc.), des monographies et des rapports gouvernementaux (Documents de la Session no.8 et de la sécurité civile). Les documents ont été consultés à partir de registres de journaux indexés à la médiathèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières, ainsi que dans les bases de données du Centre interuniversitaire d'études québécoises (CIEQ-UQTR). Il faut noter que les inondations sont répertoriées dans des documents de provenance variée, en raison de la diversité de la problématique des inondations qui touche tout autant les populations riveraines qui ont été perturbées à divers niveaux que les infrastructures endommagées. Des lieux ciblés font partie de la zone d'étude, incluant quelques mentions concernant le lac Saint-Pierre. Étant donné que le lac Saint-Pierre est un lac fluvial (élargissement du fleuve Saint-Laurent) avec une plaine d'inondation pouvant s'étendre jusqu'à 600 km², il est plus que normal de considérer les fluctuations du lac comme un impact supplémentaire aux phénomènes des inondations à l'embouchure de la rivière Saint-François. Il est important de préciser ici la notion d'inondation utilisée dans le présent ouvrage. Lors de

la recherche dans les documents historiques, des mots clés comme inondation, crue, hautes eaux, débâcle, débordement... ont été utilisés afin de répertorier les événements ayant touché la population riveraine. Une inondation est définie comme :

« Phénomène hydrologique de débordement des cours d'eau hors de leur lit. Submersion des propriétés avoisinant les fleuves ou rivières ((qui)) est la conséquence d'une crue naturelle ou d'une surélévation accidentelle des eaux. »³

La plupart des inondations sont causées par le débordement de cours d'eau, mais elles peuvent aussi se produire sur le bord d'un lac ou de la mer dont le niveau peut monter à cause d'un ruissellement excessif, d'une onde de tempête ou du battement de la houle. Elles peuvent survenir n'importe où, à la campagne comme en ville, à n'importe quelle période de l'année. La principale cause d'inondation au Québec est sans doute l'accumulation des précipitations hivernales. L'eau est retenue pendant plusieurs mois sous forme de neige, de verglas et de grésil. Avec le dégel printanier, elle s'écoule en seulement quelques semaines. Pendant cette période, il suffit de pluies abondantes, d'un embâcle ou simplement d'un dégel rapide pour qu'il y ait inondation.

En ce qui concerne les variations climatiques, les données des stations climatologiques de Pierreville, Sorel, Drummondville et Nicolet ont été utilisées. Ces données proviennent des données climatiques historiques d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2007). Nous avons colligé les données des températures minimums, maximums et moyennes ainsi que des précipitations totales, de pluie, de neige, et ce, pour la période de 1914-2003.

En vue de la cartographie des changements anthropiques, les photographies aériennes et les fichiers vectoriels ont été rassemblés afin d'obtenir un inventaire correspondant à l'aire d'étude et aux besoins du projet de recherche (annexe B). Ces éléments

³ cf. site internet du Grand dictionnaire terminologique (<http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>)

cartographiques proviennent de la Photothèque nationale de l'air⁴, de la base de données du ministère des Ressources naturelles du Canada⁵ et du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec⁶. Le choix des photographies aériennes doit refléter autant que possible la couverture temporelle des autres données pour en arriver au final avec des documents couvrant la période de 1928 à 2005. Les photographies aériennes qui n'étaient pas disponibles sous un format numérique ont été numérisées au laboratoire interdisciplinaire d'application en géomatique environnementale (LIAGE, UQTR). En tout, 60 images couvrant les années 1928, 1964 et 1979 ont été transférées en format numérique permettant leur analyse dans un système d'information géographique (SIG). Par contre, un assemblage pour chacune des années a été nécessaire afin de simplifier les manipulations et de pouvoir les intégrer à un SIG en prévision de l'analyse des données multisources.

1.6.2. Géoréférencement et mosaïques

La première étape de ce couplage a été d'intégrer les informations spatiales de ces fichiers numériques par le géoréférencement et ainsi obtenir un document utilisable dans un SIG pour la cartographie. Le géoréférencement vise à assigner des coordonnées géographiques d'un fichier de référence à chacun des pixels d'une image sans référence spatiale. De façon sommaire, cette procédure consiste à intégrer les images numériques dans le logiciel *Geomatica* et à l'aide d'un fichier vectoriel, on identifie des points de contrôle concordant dans le fichier vectoriel et dans l'image. Par exemple, on peut utiliser le fichier vectoriel du réseau routier pour lequel on sélectionne un point de contrôle comme une intersection routière. Ensuite, on retrouve cette même intersection

⁴ cf. site internet la collection de la Photothèque nationale de l'air

⁵ cf. site internet Géogratias

⁶ cf. site internet Géomathèque

dans l'image pour le géoréférencement. Afin d'augmenter la précision, le nombre de points de contrôle doit être élevé et se répartir le plus uniformément possible sur le territoire sélectionné. À ce moment, le logiciel attribue les coordonnées géographiques du point de contrôle du fichier vectoriel à celui de l'image. Cette étape est répétée pour chacune des images. Ce processus permet ensuite d'afficher l'image dans un contexte spatial. Les avantages sont une juxtaposition avec les autres couches de données occupant le même espace géographique et d'en extraire les mesures, les coordonnées ou les superficies en un point donné.

Étant donné que la couverture spatiale de l'aire d'étude nécessite plusieurs photographies aériennes et que la manipulation d'un nombre élevé de documents est moins efficace, il a fallu prévoir une étape d'assemblage des photographies aériennes. Il est question ici de la création d'une mosaïque qui permet de réunir en une seule image plusieurs photographies aériennes. Après avoir assigné les limites de la zone d'étude, une procédure du logiciel permet de juxtaposer les différentes images d'une même année afin de créer la mosaïque.

1.6.3. Cartographie

Une fois que les mosaïques sont créées, on peut inclure les fichiers dans le logiciel *ArcGIS 9.3* qui est un système d'information géographique permettant la réalisation de documents cartographiques et qui peut aussi servir à diverses analyses spatiales. À ce moment, la création d'une base de données géographique a permis de rassembler tous les fichiers vectoriels et les mosaïques dans une base de données, et ce, afin de simplifier les analyses cartographiques. La cartographie des trois types de superficies déterminés comme agricole, forestière et urbaine s'effectue tout d'abord par la création d'une couche d'information pour chacune des superficies et ceci, pour chaque année. Par la suite, la création des polygones des superficies a été réalisée à titre d'exemple, par la délimitation du champ agricole visible sur la mosaïque sous-jacente. Une fois cette

opération exécutée pour toutes les superficies et toutes les années, un outil du SIG a permis de calculer les surfaces couvertes par les polygones des différents types de superficies. Enfin, la comparaison des valeurs de ces superficies entre les différentes années et l'évaluation de l'évolution temporelle des modifications anthropiques du territoire ont été effectuées.

1.6.4. Analyses statistiques des données

Une autre étape du projet consistait à effectuer des analyses statistiques sur les différentes données hydroclimatiques afin de répondre aux hypothèses de travail. Tout d'abord, un contrôle des données climatologiques a été effectué entre les différentes stations afin de vérifier leur homogénéité ou leur disparité. Les données disponibles pour les stations de Sorel, Nicolet et Drummondville couvrent la période de 1914 à 2003. Cependant, la station de Pierreville regroupe des données de 1981 à 2000 seulement. Comme cette station est située directement dans la zone d'étude, il était important qu'elle puisse couvrir une période aussi longue que les autres stations environnantes afin d'établir des liens avec la chronologie des inondations. Aussi avons-nous choisi de recourir à la modélisation des données manquantes de manière à répondre à cette exigence de la chronologie séculaire souhaitée. De très fortes relations linéaires entre les stations de Sorel, Nicolet, Drummondville et Pierreville nous ont d'ailleurs permis de modéliser les données manquantes pour cette dernière station (tableau 1.1).

Des analyses d'anomalies climatiques des précipitations ont déjà été réalisées sur la période de référence de 1971-2000, qui est la période des Normales climatiques⁷ la plus récente, dans l'étude de Saint-Laurent et al. (2009) pour la station de Drummondville. Ces analyses d'anomalies climatiques consistent à faire ressortir les années où l'on observe des précipitations différentes de la période des Normales climatiques de

⁷ Déterminé par Environnement Canada

référence. On peut observer soit des écarts importants qui témoignent de périodes plus humides ou plus sèches. Le principe est de mesurer les écarts mathématiques entre les « précipitations moyennes » ce qui permet de différencier les années les plus pluvieuses et plus sèches de la série chronologique analysée avec la période de référence. Ensuite, l'analyse des événements d'inondation recensés à l'aide de statistiques descriptives a permis de distinguer la présence de deux groupes. Des analyses de Chi-carré ont été utilisées afin d'explorer les relations entre ces deux groupes. Ces analyses ont été appliquées sur le nombre d'événements par année, mais également sur le nombre d'événements par mois. Un regroupement des événements d'inondation a été réalisé afin de représenter les événements pour la période hivernale (décembre, janvier et février) et la période printanière (mars, avril et mai), soit deux périodes cruciales dans l'analyse des événements d'inondation. Également, une analyse de Chi-carré a été utilisée pour la période hivernale et pour la période printanière afin d'évaluer l'efficacité des opérations de déglacement depuis son instauration en 1976. L'étude des données météorologiques a été réalisée à l'aide du test des séries chronologiques de *Mann-Kendall* sous *SYSTAT 12* afin de dégager une tendance pour chacune des variables pour les mois de décembre, janvier, février, mars, avril et mai.

1.7. Résultats

1.7.1. Anomalies climatiques

Les analyses des anomalies des précipitations pour la station de Drummondville révèlent une grande variabilité des précipitations (figure 1.3). On observe par contre une succession de hausse et de baisse de la quantité des précipitations au cours du dernier siècle en relation de la normale climatique de 1971-2000. D'ailleurs, entre 1915 et 1925, on assiste à des précipitations au dessus de la normale établi. Par ailleurs, durant la période de 1955 à 1970, les précipitations sont en dessous de la normale pour ensuite revenir au dessus de la normale après 1970.

1.7.2. Événements d'inondation

L'inventaire des événements d'inondation couvre la période de 1865 à 2005 pour toute la zone d'étude (embouchure de la rivière Saint-François). En observant la fréquence des événements recensés, on observe deux groupes distincts, soit avant et après 1975. L'exploration des données par des statistiques descriptives permet d'établir les deux groupes à la période de 1865 à 1975 et de 1975 à 2005 (figure 1.4). On peut remarquer une forte hausse pour la période 1975-2005. L'exploration des fréquences mensuelles permet de visualiser la répartition des inondations à l'échelle de la série durant l'année (figure 1.5). On peut y noter que les inondations se produisent principalement durant le printemps (surtout en mars et avril), soit au moment du dégel du couvert de glace et de la débâcle des rivières. Par contre, la période hivernale, soit les mois de décembre, janvier et février, présente une forte augmentation des inondations après 1975. On observe l'effet contraire pour le printemps avec une faible diminution à la suite de l'instauration des opérations de déglacage. Par la suite, nous avons vérifié la tendance des données de température et de précipitation durant l'hiver et le printemps sur toute la série chronologique (Tableau 1.2). Les résultats des analyses de tendances des séries chronologiques montrent une tendance significative d'augmentation de la température minimum moyenne sauf pour décembre. En contrepartie, les précipitations totales moyennes présentent une tendance à la baisse, sauf pour avril et mai.

1.7.3. Occupation du territoire

L'occupation du territoire a été caractérisée selon trois catégories d'utilisation du sol pour cette étude soit, les surfaces agricoles, forestières et urbaines. La couverture temporelle de ces modifications correspond à la période de 1928 à 2005, laquelle a été déterminée selon la disponibilité des photos aériennes de la zone d'étude. Rappelons qu'il est rare d'obtenir des photographies aériennes avant les années 1930 sur le

territoire canadien⁸. Sur les couvertures analysées, on y voit clairement la diminution des superficies agricoles entre 1928, 1964, 1979, 1998 et 2005. L'effet inverse s'observe pour les surfaces forestières et urbaines. Cette tendance de la réduction des surfaces agricoles s'observe d'ailleurs dans plusieurs régions du Québec (Jean, 1997).

Dans la zone d'étude, le pourcentage des superficies de chacune des catégories identifiées dans cette analyse (agricole, forestière et urbaine) a été représenté dans la figure 1.4. On peut y voir que la superficie forestière passe de 27 % en 1928 à 38 % en 2005, et que les superficies agricoles passent de 53 % à 39 % pour la même période. On peut penser que l'augmentation des superficies forestières peut avoir un effet non négligeable sur la diminution des inondations étant donné que la reforestation du territoire engendre le plus souvent une diminution du ruissellement de surface et parallèlement une diminution de l'écoulement en rivière (Simard, 1999). À cet égard, il faut rappeler que la reforestation et le type de couvert végétal influencent le ruissellement et la réponse hydrologique du cours d'eau devant des précipitations importantes (Simard, 1999; Wissmar *et al.*, 2004). D'ailleurs, Simard (1999) a illustré la différence de la propagation d'une onde de crue lors d'une averse avant et après l'urbanisation d'un territoire. Également, l'étude de Wissmar *et al.* (2004) intègre des variables caractérisant l'utilisation du sol à un modèle hydrologique afin d'évaluer l'impact de ces variables sur le ruissellement. Il démontre à quel point le couvert forestier dans un bassin influence le ruissellement des précipitations vers le cours d'eau faisant ainsi varier le débit. Relatif à ces résultats, il établit un lien entre l'évolution du couvert forestier et la récurrence des débits lors d'événements d'inondation. Il démontre qu'avec un seuil minimum de 70% de couvert forestier, le ruissellement de surface diminue suffisamment pour avoir un impact sur les débits observés.

⁸ Référence le site internet de la Photothèque nationale de l'air (PNA) : la collection de la Photothèque nationale de l'air (http://airphotos.nrcan.gc.ca/collection_f.php)

Pour notre étude, la progression des surfaces forestières sur le territoire n'apparaît pas, à première vue, comme un facteur déterminant puisqu'on observe plutôt une augmentation des inondations depuis 1975, malgré cette reprise forestière. Il faut donc considérer que les facteurs hydroclimatiques jouent un rôle prédominant dans l'explication de la récurrence des inondations de notre territoire d'étude, sans négliger toutefois les impacts des changements anthropiques survenus dans les bassins en amont de notre région. Tous ces éléments sont discutés de façon plus exhaustive dans le chapitre II du mémoire.

1.8. Conclusion

L'objectif principal de ce projet de recherche est de dégager des liens entre les changements d'occupation du territoire, les variables climatiques et la chronologie des événements d'inondation à l'embouchure de la rivière Saint-François. Pour ce faire, une recension exhaustive des événements d'inondation et des données climatiques dans l'aire d'étude et à proximité, depuis 1865 jusqu'à 2005 a été réalisée. C'est à l'aide entre autres, de la presse régionale d'époque, des bases de données disponibles et des travaux antérieurs (Saint-Laurent, 2001) que la chronologie des événements d'inondation a été reconstitué. Pour ce qui est des données climatiques, la station située à Pierreville ne couvrait qu'une courte période ne permettant pas de dégager une tendance significative. La modélisation des données manquantes avec les stations environnantes nous a permis d'obtenir une série couvrant près d'un siècle de données climatiques. C'est à l'aide d'une régression simple entre toutes les stations que la meilleure relation pour chacune des variables a pu être déterminée, nous permettant ainsi de compléter les données de la station de Pierreville.

Par la suite, la caractérisation des modifications de l'occupation des terres sur une période de 1928 à 2005 a été réalisée. C'est en utilisant les photographies aériennes et les orthophotographies que les changements de l'occupation des terres ont pu être

observés. La disponibilité de ces documents a permis de couvrir une échelle temporelle de près d'un siècle ce qui permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'évolution de l'occupation du territoire de tout le secteur de l'embouchure de la rivière Saint-François. La première étape d'analyse du territoire consistait d'abord à faire un inventaire exhaustif des documents disponibles de cette région (cartes, photos aériennes, rapports, etc.). Ensuite, le traitement des photographies aériennes avec l'aide du logiciel Geomatica a permis de créer des documents normalisés pour leur utilisation dans le logiciel ArcGIS. Finalement, la création des documents cartographiques a permis de visualiser les modifications d'occupation du territoire ainsi que d'extraire des superficies précises de ces changements anthropiques.

À la suite de l'application de diverses analyses statistiques notamment, il a été possible de démontrer des changements notables du climat, dont une tendance au réchauffement des températures minimum en hiver et au printemps qui s'observe sur la série chronologique de la période entre 1914 et 2003. Cette tendance climatique vient confirmer l'occurrence de plus en plus importante des périodes de redoux durant la saison hivernale. D'ailleurs, cette occurrence a pu être mise en corrélation avec une augmentation du nombre d'inondations durant cette même période de l'année. En effet, un adoucissement des températures permet notamment une fonte partielle du couvert de glace et qui est parfois suffisante pour créer une crue d'inondation. Par ailleurs, les précipitations connaissent plutôt une diminution ne permettant pas d'expliquer la hausse des inondations après 1975. D'autre part, les événements d'inondation connaissent une diminution significative au printemps à la suite de l'instauration des opérations de déglacage. Il semble donc que les opérations de déglacages soient efficaces pour réduire les inondations dans ce secteur. Par contre, la hausse observée durant l'hiver peut s'expliquer par l'adoucissement des températures occasionnant un décalage de la période de débâcle qui arrive plus hâtivement dans la saison, soit avant la période prévue pour le déglacage.

Enfin, en ce qui concerne les modifications de l'occupation du territoire, les résultats obtenus nous permettent de suivre l'évolution des changements importants survenus sur le territoire, même si à l'échelle régionale, ces changements peuvent être jugés mineurs par rapport à d'autres régions du Québec. Sur le plan hydroclimatique, on ne peut toutefois pas établir avec certitude l'impact de ces changements de l'occupation du territoire sur les occurrences des inondations. Par contre, l'état des connaissances actuelles nous permet de constater que le couvert végétal peut jouer un rôle important sur la récurrence des inondations, en permettant une interception et une rétention des précipitations, réduisant ainsi le ruissellement de surface vers le cours d'eau. La caractérisation du territoire à l'embouchure de la rivière Saint-François démontre une reforestation relativement importante, bien qu'elle s'effectue surtout en marge de la zone d'étude. On ne peut toutefois conclure que cette reforestation de notre territoire permet de réduire les effets de ruissellement et la récurrence des inondations, et que d'autres facteurs interviennent, dont les facteurs hydroclimatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Andreassian, V. (2004). "Forest cover and watershed hydrological behaviour." Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau(2): 31-35.
- Andrishak, R. et F. Hicks (2008). "Simulating the effects of climate change on the ice regime of the Peace River." Canadian Journal of Civil Engineering **35**(5): 461-472.
- Barriendos, M. et F. S. Rodrigo (2006). "Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **51**(5): 765-783.
- Beltaos, S. (2008). "Progress in the study and management of river ice jams." Cold Regions Science and Technology **51**(1): 2-19.
- Beltaos, S. et B. C. Burrell (2003). "Climatic change and river ice breakup." Canadian Journal of Civil Engineering **30**(1): 145-155.
- Beltaos, S. et T. Carter (2009). "Field studies of ice breakup and jamming in lower Peace River, Canada." Cold Regions Science and Technology **56**(2-3): 102-114.
- Benito, G., *et al.* (2004). "Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods." Natural Hazards **31**(3): 623-643.
- Bergeron, G. et Direction générale des eaux (1977). Hydrométéorologie : service de la météorologie : bassin versant de la Saint-François. Québec ;, Ministère des richesses naturelles.
- Bergeron, L., *et al.* (1997). Chapitre de l'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement du climat : tome V. Ottawa, On, Environnement Canada.
- Bonsal, B. R. et T. D. Prowse (2003). "Trends and variability in spring and autumn 0 degrees C-isotherm dates over Canada." Climatic Change **57**(3): 341-358.
- Bronstert, A., *et al.* (2002). "Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities." Hydrological Processes **16**(2): 509-529.

- Bryant, R. G. et D. J. Gilvear (1999). "Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland." Geomorphology **29**(3-4): 307-321.
- Camorani, G., *et al.* (2005). "Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems." Physics and Chemistry of the Earth **30**(8-10): 561-574.
- Catalogne, G. d., *et al.* (1921). Suite du gouvernement des Trois Rivières qui comprend en descendant le fleuve St Laurent depuis les isles de Richelieu jusqu'à la sortie du lac St Pierre [ressource électronique] / levée en 1709 par les ordres de Monseigneur le comte de Ponchartrain, commandeur des ordres du roy, ministre et secrétaire d'etat par le Sr Catalogne, lieutenant des troupes ; et dressée par Jean Baptiste Decoüagne. [Québec, s.n.]: 1 carte.
- Chase, T. N., *et al.* (2000). "Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter." Climate Dynamics **16**(2-3): 93-105.
- COGESAF (2006). Analyse du bassin versant de la riviere Saint-Francois: 255.
- Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages (1997). Rapport Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. de la. [Québec, Ministère du Conseil exécutif].
- Environnement Canada (2007). Données climatiques quotidiennes du Canada (DCQC).
- Ferreira, M. T., *et al.* (2005). "Changes in Riparian woods over space and time: Influence of environment and land use." Forest Ecology and Management **212**(1-3): 145-159.
- Gagnon, P., *et al.* (2009). "Hydrometeorological validation of a Canadian Regional Climate Model simulation within the Chaudiere and Chateauguay watersheds (Quebec, Canada)." Canadian Journal of Civil Engineering **36**(2): 253-266.
- Gagnon, R.-M., *et al.* (1970). Conditions meteorologiques critiques et crues exceptionnelles des rivieres chaudiere et saint-francois. Quebec, Ministère des Richesses Naturelles.Direction Generale des Eaux.
- Gélinas, J. P. et Direction générale des eaux (1977). Caractéristiques physiques : bassin versant de la Saint-François. Québec, Ministère des richesses naturelles.
- Giret, A. (2007). Géographie de l'écoulement fluvial. Paris, L'Harmattan.
- Hicks, F. (2009). "An overview of river ice problems: CRIPE07 guest editorial." Cold Regions Science and Technology **55**(2): 175-185.

- Jasek, M. (2003). "Ice jam release surges, ice runs, and breaking fronts: field measurements, physical descriptions, and research needs." Canadian Journal of Civil Engineering **30**(1): 113-127.
- Jean, B. (1997). Territoires d'avenir : pour une sociologie de la ruralité. Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec.
- Kestens, Y. (2000). Les conséquences de la déforestation sur le cycle hydrologique : une étude de cas, bassin versant de la Haute Srepok, Vietnam.
- Livingston, J. M., *et al.* (2009). "Floodplain stratigraphy of the ice jam dominated middle Yukon River: a new approach to long-term flood frequency." Hydrological Processes **23**(3): 357-371.
- Magdelaine, C. (2001). "Changement climatique : climat et effet de serre." Retrieved 15 septembre, 2009.
- Mareuil, A., *et al.* (2007). "Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Chateauguay River basin, Canada." Canadian Journal of Civil Engineering **34**(9): 1048-1060.
- Mekis, E. et W. D. Hogg (1999). "Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series." Atmosphere-Ocean **37**(1): 53-85.
- Mitchell, T. D. et P. D. Jones (2005). "An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids." International Journal of Climatology **25**(6): 693-712.
- New, M., *et al.* (1999). "Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology." Journal of Climate **12**(3): 829-856.
- New, M., *et al.* (2000). "Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate." Journal of Climate **13**(13): 2217-2238.
- New, M., *et al.* (2001). "Precipitation measurements and trends in the twentieth century." International Journal of Climatology **21**(15): 1889-1922.
- Nirupama, N. et S. P. Simonovic (2007). "Increase of flood risk due to urbanisation: A canadian example." Natural Hazards **40**(1): 25-41.
- Pachauri, R. K., *et al.* (2008). "Climate change 2007 synthesis report." from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.

- Perrier, R., *et al.* (1999). Survol des cas de pluies abondantes au Québec : rapport scientifique. Ottawa,, La Division.
- Primeau, S. et Direction de la qualité des cours d'eau (1992). Qualité des eaux du bassin de la rivière Saint-François, 1976 à 1991. Québec, Ministère de l'environnement, Direction de la qualité des cours d'eau.
- Proulx, M.-U. (2002). L'économie des territoires au Québec : aménagement, gestion, développement. Montréal, Presses de l'Université du Québec.
- Rey, F., *et al.* (2004). "Role of vegetation in protection against surface hydric erosion." Comptes Rendus Geoscience **336**(11): 991-998.
- Saint-Laurent, D., Couture, C., et McNeil, É (2001). "Spatio-Temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada." Environments **29**(2): 73-89.
- Saint-Laurent, D. et M. Hahni (2008). "Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada)." Environnement Urbain **2**: a50-a72.
- Saint-Laurent, D., *et al.* (2009). "Hydroclimatic variability and relation with flood events (Southern Québec, Canada)." Water Resources **36**(1): 43-56.
- Saint-Laurent, D., *et al.* (2008). "Use geopedological methods for the evaluation of sedimentation rates on river floodplains, southern Quebec, Canada." Catena **73**(3): 321-337.
- Simard, M. (1999). Proposition de mesures à adopter pour réduire les risques inhérents à d'éventuelles inondations catastrophiques de la rivière Saint-François à Sherbrooke.
- Toba, T. et T. Ohta (2008). "Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model." Hydrological Processes **22**(14): 2634-2643.
- Whitfield, P. H. (2001). "Linked hydrologic and climate variations in British Columbia and Yukon." Environmental Monitoring and Assessment **67**(1-2): 217-238.
- Wissmar, R. C., *et al.* (2004). "Effects of changing forest and impervious land covers on discharge characteristics of watersheds." Environmental Management **34**(1): 91-98.

Zielonka, T., *et al.* (2008). "A reconstruction of flood events using scarred trees in the Tatra Mountains, Poland." Dendrochronologia **26**(3): 173-183.

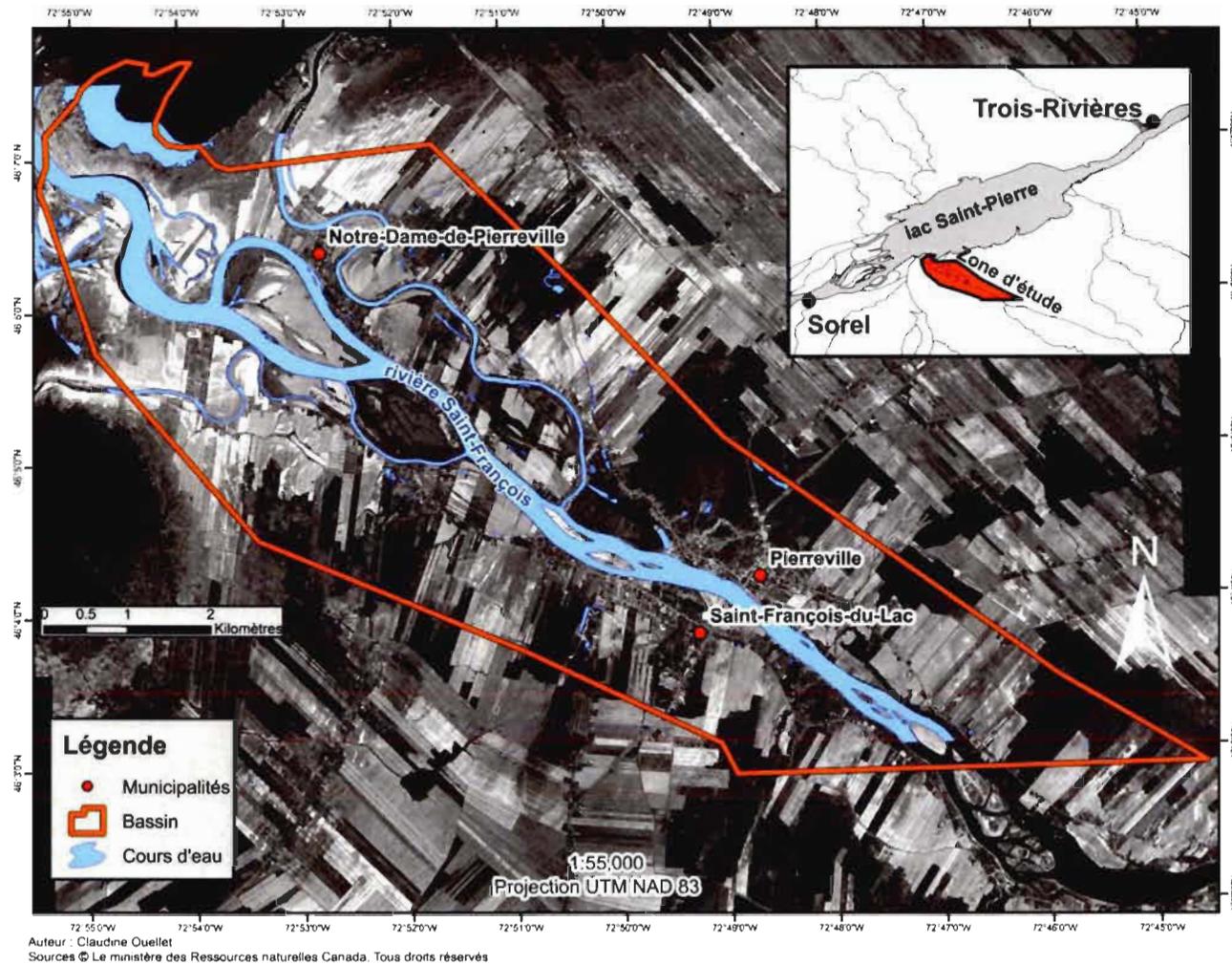


Figure 1.2 Délimitation de la zone d'étude à l'embouchure de la rivière Saint-François

Tableau 1.1 Coefficients de détermination et valeurs de p des régressions pour les différentes variables climatiques pour la modélisation de la station de Pierreville à partir des stations voisines

Variables	Station Référence	r^2	p
Température Maximum	Nicolet	0.9906	< 0.0001
Température Minimum	Drummondville	0.9964	< 0.0001
Température Moyenne	Nicolet	0.9973	< 0.0001
Pluie	Nicolet	0.8551	< 0.0001
Neige	Sorel	0.925	< 0.0001
Précipitation Totale	Nicolet	0.756	< 0.0001

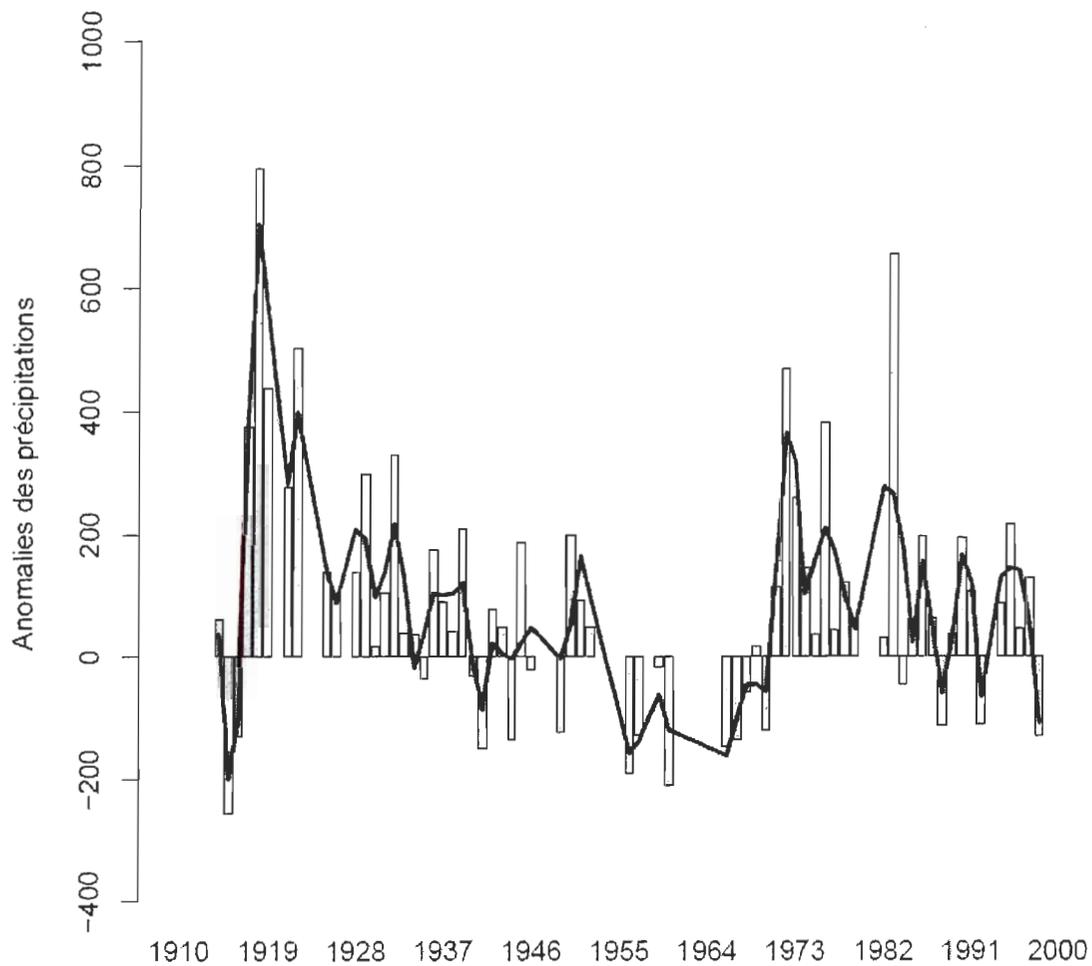


Figure 1.3 Anomalies des précipitations totales pour la station de Drummondville selon la normale climatique de 1970-2000 (Tiré de Saint-Laurent *et al.*, 2009)

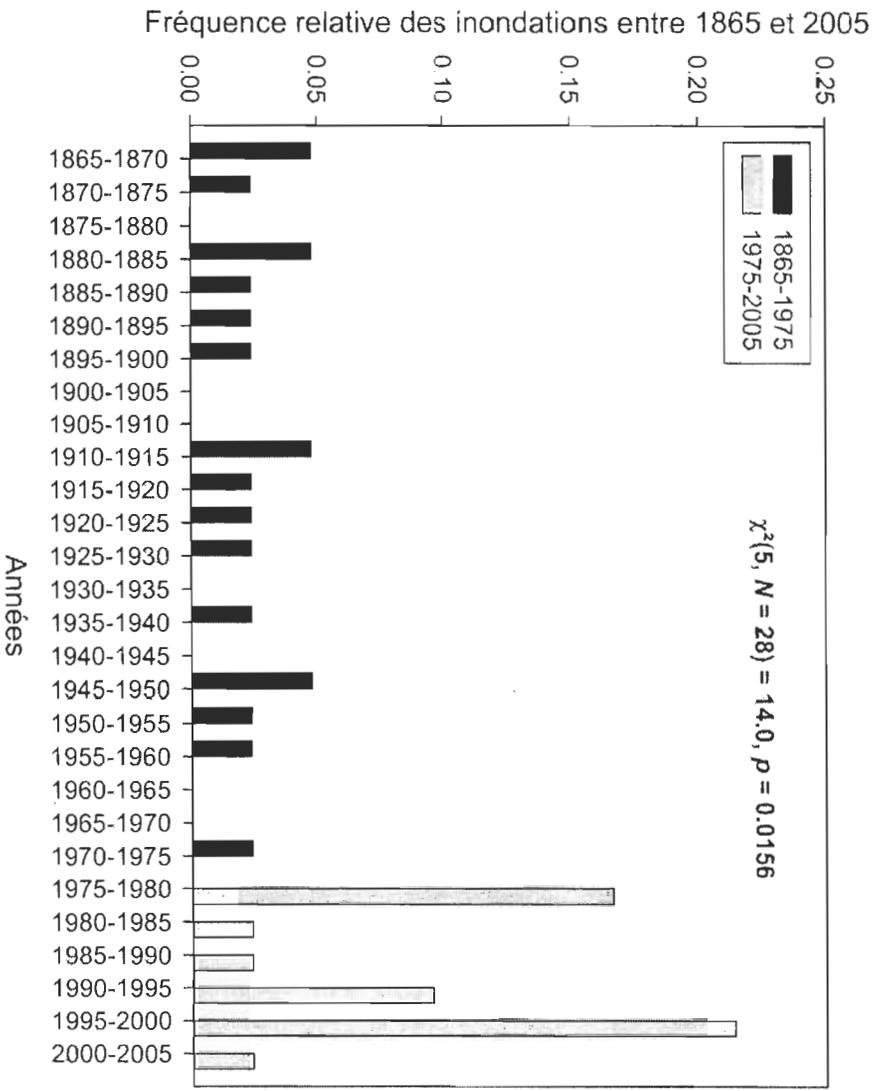


Figure 1.4 Fréquences relatives des inondations entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Division de la série chronologique en deux groupes.

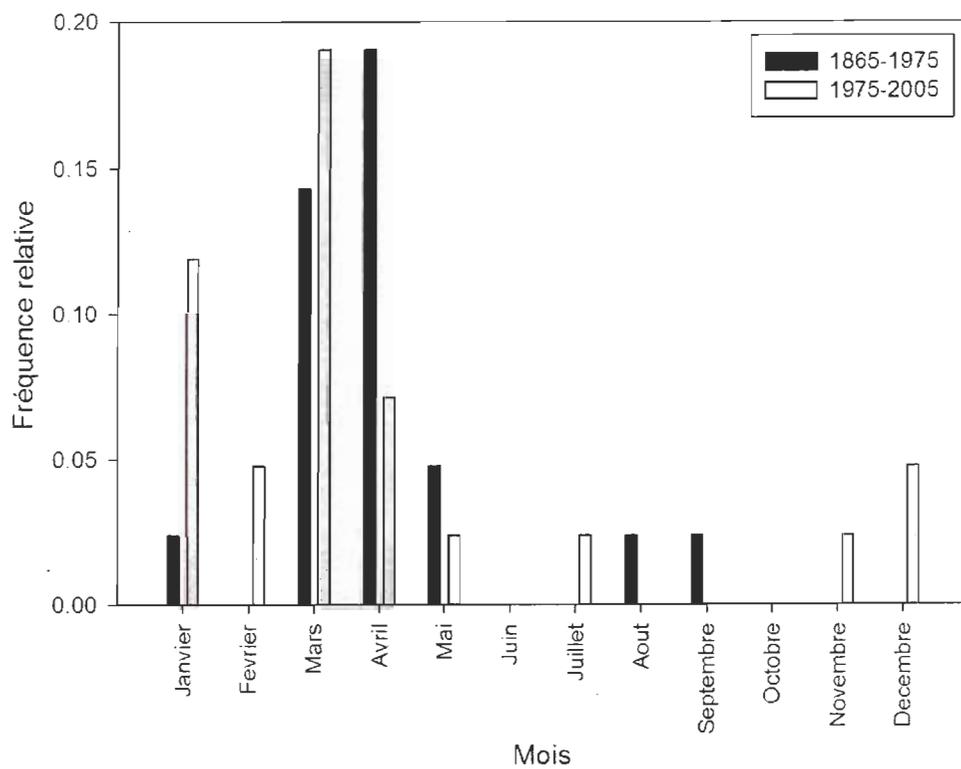


Figure 1.5 Fréquence relative des inondations par mois entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude

Tableau 1.2 Analyse de tendance des mois d'hiver et du printemps pour les variables de température minimum et de précipitation totale dans la zone d'étude. Les valeurs en gras étant significatives.

Variable	Température min.	Précipitation totale
Mois	p-value	p-value
Décembre	0.143	0.017
Janvier	0.034	0.000
Février	0.002	0.000
Mars	0.005	0.004
Avril	0.000	0.061
Mai	0.044	0.492

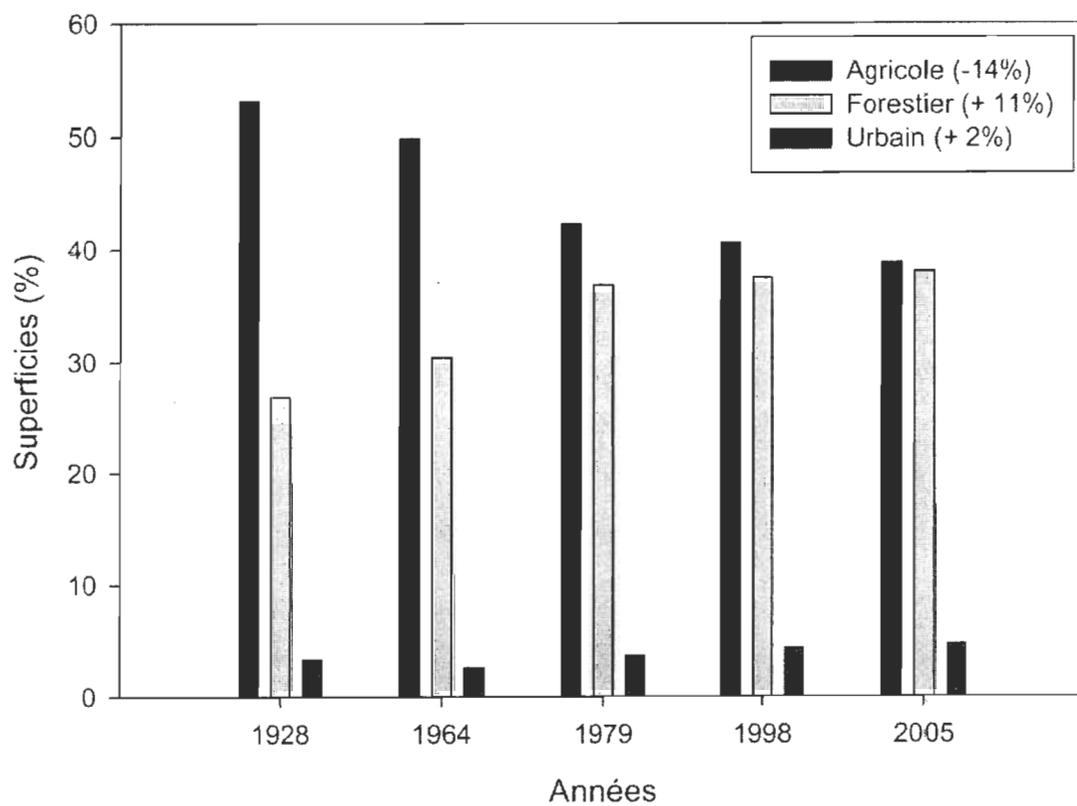


Figure 1.6 Pourcentage de superficies couvertes selon trois catégories (agricole, forestier et urbain). Le pourcentage dans la légende indique le taux de variation des superficies entre 1928 et 2005

CHAPITRE 2

CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS D'INONDATION À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS EN LIEN AVEC LES VARIATIONS HYDROCLIMATIQUES ET LES MODIFICATIONS ANTHROPIQUES (QUÉBEC, CANADA)⁹

⁹ Article à soumettre à la revue *Cahiers de Géographie du Québec*.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel des changements climatiques et de la transformation du territoire par les activités humaines, il devient nécessaire de quantifier ces changements et leurs effets sur une échelle séculaire. À l'embouchure de la rivière Saint-François, les inondations printanières par les embâcles ont toujours été un problème récurrent dans ce secteur. L'implantation des opérations de déglçage en 1976 a permis de contrer la formation de ces embâcles de glace fréquente à l'embouchure. Par contre, la région connaît toujours une hausse des inondations. Cet article vise l'évaluation des variations dans la récurrence des inondations par les données climatologiques ainsi que des modifications de l'occupation du territoire. Notre étude démontre une augmentation des inondations depuis les années 70, et ce, malgré l'implantation des opérations de déglçage. Ces inondations sont provoquées par des redoux durant l'hiver soit en dehors de la période d'action de la garde côtière. De plus, les changements d'occupation du territoire ne permettent pas de réduire le ruissellement, car malgré une reforestation importante, celle-ci n'a pas été faite près des berges.

Mots clés: Inondations, modification anthropique, variation climatique, chronologie, rivière Saint-François

ABSTRACT

In the current context of global climate change and the transformation of land by human activities, it becomes necessary to quantify these changes and their effects on a scale of centuries. At the mouth of the St. Francis River, flooding by spring ice jams has always been a problem in the area. The implementation of icebreaking operations in 1976 has prevented the formation of these ice jams characteristics. For cons, the region continues rising floods. This article aims at assessing changes in the recurrence of floods from climate data and changes in land use. This study demonstrates an increase in floods since the 70s despite the introduction of icebreaking operations. These floods are caused by mild weather during the winter or outside the period of action of the Coast Guard. Similarly, changes in land use do not reduce runoff, because despite substantial reforestation, it has not been made by the banks.

Key words: flood, anthropic modification, climatic variability, chronology, Saint-François river

2.1. Introduction

Avec l'augmentation relative des phénomènes climatiques jugés extrêmes ou exceptionnels, la recherche au niveau international s'oriente de plus en plus vers le développement des modèles climatiques complexes qui visent à mieux comprendre les causes et les mécanismes de ces phénomènes et de prévoir les changements globaux anticipés (New *et al.*, 2001; Pachauri *et al.*, 2008). À l'échelle canadienne, les études concernant les changements climatiques effectuées à partir des modèles climatiques (ex. Modèle de circulation générale de l'atmosphère de quatrième génération – MCGA4) (Environnement Canada 2004a) et des registres historiques des données météorologiques ont permis d'identifier globalement les tendances climatiques et les variations des conditions hydroclimatiques à long terme (Mekis et Hogg, 1999; New *et al.*, 1999; New *et al.*, 2000; Chaumont, 2004; Trambly *et al.*, 2005; Yagouti *et al.*, 2008). Plusieurs de ces études démontrent néanmoins qu'il est difficile d'obtenir une tendance claire à l'échelle nationale ou mondiale, car la variabilité de certains paramètres, notamment les précipitations, est relativement importante (Chaumont, 2004; Trambly *et al.*, 2005). Il devient donc nécessaire de réduire l'échelle spatiale dans l'étude des variations climatiques afin d'en augmenter la précision. D'ailleurs, l'étude de Yagouti *et al.* (2008) a démontré que les précipitations ont une tendance à la hausse dans le sud du Québec ayant comme résultat une plus grande occurrence des événements d'inondation. D'autres auteurs se sont intéressés au rôle des changements climatiques dans la variabilité d'occurrences des inondations, mais en intégrant une échelle temporelle séculaire, voire même millénaire, leur permettant de distinguer les variations naturelles versus celles d'origine anthropique (Saint-Laurent, 2001; Bonsal et Prowse, 2003; Benito *et al.*, 2004; Mitchell et Jones, 2005; Barriendos et Rodrigo, 2006).

Plusieurs chercheurs s'intéressent aux mécanismes de formation et de fragmentation du couvert de glace en rivière, car cette dynamique glacielle, particulière aux pays nordiques, est souvent à l'origine d'événements d'inondation (Beltaos et Burrell, 2003; Jasek, 2003; Beltaos, 2008; Beltaos et Carter, 2009; Hicks, 2009). Certains ont effectué

des études sur les changements climatiques, notamment les impacts du réchauffement sur le couvert de glace en milieu fluvial (Beltaos et Burrell, 2003; Andrishak et Hicks, 2008). Ils ont démontré que le réchauffement de la température entraînerait un délai dans la formation du couvert de glace au début de la saison, mais aussi une débâcle plus hâtive au printemps.

En plus de l'impact des variations climatiques sur le régime hydrologique, l'occupation anthropique du territoire peut avoir un impact marqué sur la variabilité du régime fluvial (Lee et Heaney, 2003). D'ailleurs, les recherches portant sur l'importance du couvert végétal (forestier et agricole) sur le régime hydrologique ont connu un essor depuis la dernière décennie (Bryant et Gilvear, 1999; Chase *et al.*, 2000; Kestens, 2000; Andreassian, 2004; Rey *et al.*, 2004; Wissmar *et al.*, 2004; Camorani *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; Toba et Ohta, 2008). À travers ces travaux, il a été démontré que le type de couvert végétal influençait le ruissellement et la réponse hydrologique du cours d'eau lors de précipitations importantes. Notamment, Simard (1999) illustre la différence de la propagation d'une onde de crue lors d'une averse après l'urbanisation d'un territoire. Par ailleurs, l'étude de Rey *et al.* (2004) dresse une revue de l'état des connaissances en ce qui concerne le rôle de la végétation contre l'érosion hydrique de surface. On y constate que non seulement le couvert végétal permet d'intercepter les eaux de pluie, mais que son rendement est tributaire du pourcentage de recouvrement de la couverture végétale, de sa répartition ainsi que du type de végétation (agricole, forestière, etc.). Malheureusement, peu d'études au Québec se sont penchées sur l'influence des modifications de la couverture végétale ou de l'utilisation du sol en lien avec l'hydrologie fluviale, malgré leur importance sur la fréquence des inondations notamment. Considérant que le territoire québécois a connu des modifications importantes de son territoire, surtout au cours du 19^e siècle, et que ces changements se poursuivent encore aujourd'hui, on peut comprendre l'importance de telles études sur le fonctionnement des systèmes fluviaux (crues, inondations, étiages). Pour notre territoire, on compte néanmoins quelques études qui se sont intéressées aux modifications anthropiques et aux régimes fluviaux, notamment dans la portion moyenne du bassin de

la rivière Saint-François (Saint-Laurent, 2001; Saint-Laurent et Hahni, 2008; Saint-Laurent *et al.*, 2009).

En regard de ces travaux, notre étude vise à mieux comprendre l'influence des changements climatiques et anthropiques sur la récurrence des inondations à l'embouchure de la rivière Saint-François, lequel territoire a été très peu étudié, malgré que ce dernier soit une zone de confluence importante du lac Saint-Pierre. Notre étude vise dans un premier lieu à caractériser l'évolution de la récurrence des inondations sur une période couvrant plus d'un siècle soit de 1865 à 2005. Par la suite, nous souhaitons étudier le climat et son évolution pour la période de 1914 à 2003, dans le but de déterminer des variations pouvant expliquer la récurrence des inondations pour ce territoire. Finalement, nous proposons d'analyser l'évolution des modifications anthropiques du territoire afin d'identifier l'impact de ces changements sur les inondations.

2.2. Matériels et Méthodes

2.2.1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Saint-François couvre un territoire de 10 230 km² sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et traverse trois régions administratives, soit l'Estrie, la Chaudière-Appalaches et le Centre-du-Québec dans des proportions respectives de 80 %, 9 % et 11 % (COGESAF, 2006). La portion du bassin versant à l'étude couvre plus précisément l'embouchure de la rivière Saint-François depuis Pierreville, et s'étend sur une superficie de 48 km² (figure 2.1).

La délimitation de la zone d'étude s'appuie sur les limites du bassin versant défini par le Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François (COGESAF, 2006). Faisant partie de la région physiographique des Basses-terres du

Saint-Laurent (Gélinas, 1977), le relief de cette région est caractérisé par une topographie plane variant entre 0 et 60 mètres d'altitude sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent et atteint 150 mètres vers le plateau appalachien (Primeau, 1992). La partie des Basses-terres est dominée surtout par de grandes superficies agricoles, tandis que la portion amont des Appalaches comprend davantage des zones forestières ou agroforestières. Le climat est caractérisé par des hivers rigoureux et des étés relativement courts, comme plusieurs régions méridionales du Québec (Yagouti *et al.*, 2008). Les températures annuelles moyennes varient entre 4.2 et 5.8 °C et les précipitations moyennes annuelles oscillent entre 989 et 998 mm par année (COGESAF, 2006). La période de gel de la rivière Saint-François se situe généralement entre le 5 et le 13 décembre, tandis que la période de débâcle survient entre le 31 mars et le 10 avril (Bergeron *et al.*, 1977). Toutefois, ces périodes peuvent varier selon les années et selon les températures enregistrées durant le gel et le dégel. On peut penser aussi qu'avec le réchauffement climatique, ces périodes seront nettement décalées dans le temps.

En raison de son régime climatique et des caractéristiques de son réseau hydrographique, le Québec connaît des inondations annuelles ou périodiques. D'ailleurs, les riverains de la rivière Saint-François sont souvent affectés par des inondations se produisant principalement durant le printemps lors de la fonte du couvert de neige et des précipitations abondantes. Dans un secteur comme l'embouchure de la rivière Saint-François, où l'on trouve un pont, un élargissement du cours d'eau favorisant un débit plus lent en plus d'être en zone de confluence avec le lac Saint-Pierre, toutes ces conditions favorisent la formation d'embâcles de glace occasionnant des inondations. Suite à plusieurs événements d'inondation majeure, des moyens ont été instaurés sur la rivière Saint-François afin de minimiser les risques d'inondation comme des barrages et les opérations de déglacage au printemps à partir de 1976¹⁰. Comme les inondations causent des dommages aux infrastructures routières, aux bâtiments ainsi qu'aux

¹⁰ Selon l'information fournie par Capt. Steven D. Neatt, B.Sc., M.M. Superintendant Déglacage, escorte et contrôle des inondations, Pêches et Océans Canada, Garde côtière canadienne, région de Québec (conversation téléphonique le 9 octobre 2009).

résidences, les coûts reliés à ces événements deviennent de plus en plus importants à assumer par le gouvernement. D'où l'importance d'étudier la fréquence des inondations et l'incidence des changements climatiques sur ce patron de récurrence des inondations.

2.2.2. Évènements d'inondation

Le recensement des inondations a été réalisé selon les méthodes proposées par des études similaires (Barriendos et Rodrigo, 2006; Saint-Laurent et Hahni, 2008; Seidel *et al.*, 2009). L'inventaire des événements d'inondation entre 1865 à 2005 a été réalisé à partir de diverses sources documentaires (rapports gouvernementaux, articles de journaux et monographies). Ces documents d'époque s'avèrent être une source importante d'information pour identifier les événements catastrophiques comme les inondations. Les documents ont été consultés à partir de registres de journaux indexés à la médiathèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières, ainsi que dans les bases de données du Centre interuniversitaire d'études québécoises (CIEQ-UQTR). Il est important de préciser ici la notion d'inondation utilisée dans le présent ouvrage et qui est définie par l'Office de la Langue Française comme :

« Phénomène hydrologique de débordement des cours d'eaux hors de leur lit. Submersion des propriétés avoisinant les fleuves ou rivières ((qui)) est la conséquence d'une crue naturelle ou d'une surélévation accidentelle des eaux. »¹¹

Lors de la recherche dans les documents historiques, des mots clés comme inondation, crue, hautes eaux, débâcle, débordement, etc. ont été utilisés afin de répertorier les événements ayant touché la population riveraine. Pour chaque événement, la date, la durée, le lieu, le genre, le titre du document consulté, les éléments concernant les causes et les effets ont été inventoriés et par la suite intégrés dans une base de données.

¹¹ *cf.* site internet du Grand dictionnaire terminologique (<http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>)

2.2.3. Données climatiques

Afin d'évaluer les variations climatiques du siècle dernier dans la zone d'étude, les données climatiques historiques comme les températures et les précipitations ont été analysées. Ces données climatiques proviennent de bases des données gouvernementales *HYDAT* (Environnement Canada, 2005) et *Données climatiques quotidiennes canadiennes* (Environnement Canada, 2004). Les stations météorologiques de Sorel (7028200), Nicolet (7025440), Drummondville (7022160) et Pierreville (7026043) ont été utilisées afin de mieux caractériser les données climatiques de toute la région d'étude et au-delà. Les données disponibles pour les stations de Sorel, Nicolet et Drummondville couvrent la période de 1914 à 2003 et de 1981 à 2000 pour la station de Pierreville. La couverture temporelle des données climatiques de la station de Pierreville étant de plus courte durée (1981-2000) par rapport aux autres stations, nous avons jugé pertinent d'utiliser les données des trois autres stations afin de modéliser les données manquantes et couvrir ainsi une plus large période, soit de 1914 à 2003. De très fortes relations linéaires ont d'ailleurs permis de modéliser les données manquantes de la station de Pierreville (tableau 2.1).

2.2.4. Données cartographiques

La caractérisation des modifications anthropiques couvrant la période de 1928 à 2005 a été réalisée à l'aide de photographies aériennes couvrant le secteur d'étude et qui concordaient avec la couverture temporelle des données climatiques des stations météorologiques citées précédemment. Les photographies aériennes qui n'étaient pas disponibles sous un format numérique ont été numérisées au laboratoire interdisciplinaire d'application en géomatique environnementale (LIAGE, UQTR). En tout, 60 images couvrant les années 1928, 1964 et 1979 ont été transférées en format numérique.

2.2.4.1. Géoréférencement

Le géoréférencement des photographies aériennes a été réalisé dans le module *OrthoEngine* de *Geomatica 9.1*. Le géoréférencement s'est fait sur la correspondance entre des points de contrôle provenant des vecteurs du feuillet 031I02 de la Base nationale des données topographiques (Base National de Données Topographiques, 2000) et les photographies aériennes. Ces vecteurs comprenaient, entre autres, les cours d'eau, les routes principales et secondaires et les points de toponymie. Le choix des points de contrôle a été réalisé à partir de repères géographiques stables temporellement (ex. ponts, routes). Lorsqu'il était possible, la jonction de deux routes était privilégiée, mais d'autres éléments comme une petite baie, une île ou la jonction entre deux cours d'eau ont été également utilisés. Afin d'obtenir un géoréférencement adéquat, les points de contrôle ont été répartis le plus uniformément possible sur chacune des images. L'erreur induite entre les positions de chacun des points de contrôle sur le vecteur et sur l'image a été utilisée pour valider le choix des points afin de limiter la distorsion dans l'image. L'équation 2.1 a été utilisée pour calculer l'erreur entre les points de contrôle et ceux des photographies aériennes :

$$\text{Résidus} = \sqrt{\left((x - x_{obs})^2 + (y - y_{obs})^2 \right)} \quad 2.1$$

où les variables x et y correspondent aux coordonnées géographiques du fichier vectoriel et x_{obs} et y_{obs} correspondant à celles de l'image numérisée des photographies aériennes. Le tableau 2.3 présente l'erreur moyenne en x et en y pour les années 1928, 1964 et 1979. On y retrouve également le nombre d'image et de points de contrôle pour chacune des années.

2.2.4.2. Mosaïques

Les photographies aériennes nécessaires pour la couverture du territoire ont été regroupées en mosaïques afin de faciliter l'analyse des données géospatiales. Par exemple, afin de couvrir toute la zone d'étude, le nombre de photographies aériennes pour l'année 1979 s'élève à 26 photographies qui ont été rassemblées en une seule mosaïque. Cette méthode a été répétée pour chacune des années sélectionnées permettant d'obtenir un assemblage d'images géoréférencées dans une même mosaïque.

2.2.4.3. Polygones

La création d'une base de données spatiale a permis d'intégrer tous les fichiers vectoriels et les mosaïques dans une base de données afin de réduire les manipulations à partir du logiciel *ArcGIS 9.3*. L'utilisation des terres a été déterminée selon les trois catégories dominantes du territoire, soit les domaines agricoles, forestiers et urbains. La caractérisation a été effectuée à partir de l'analyse des surfaces de différentes années des mosaïques en créant des polygones couvrant les surfaces selon les trois grandes catégories mentionnées précédemment. Les valeurs de superficie des différents types de couvert d'occupation du territoire ont été calculées pour chacune des années sélectionnées afin de connaître les gains et les pertes à l'aide du logiciel *ArcGIS 9.3*. La représentation cartographique des modifications des différentes surfaces d'occupation a été réalisée pour les années 1964, 1979, 1998 et 2005 en superposant les surfaces des différentes années pour représenter les gains et les pertes entre les années. Par contre, la mosaïque de 1928 ne couvre que 15 km² de la zone d'étude au lieu des 48 km² total. D'autant plus que la zone réduite se retrouve essentiellement à l'extrémité nord de la zone d'étude où l'hydrographie y est plus importante. Il a donc été décidé afin d'éviter la redondance ainsi que d'un point de vue esthétique que les cartes ne représenteraient que les résultats de 1964, 1979, 1998 et 2005.

2.2.5. Analyses statistiques

Avant de procéder aux analyses statistiques, il est nécessaire de vérifier l'homogénéité des données utilisées. Dans cette étude, les données provenant de documents gouvernementaux sont généralement contrôlées et ajustées pour assurer leur validité. Également, comme il a été décrit plus haut, les données utilisées pour les analyses proviennent de la station de Pierreville et elles ont été modélisées afin de couvrir une période plus grande. L'analyse des événements d'inondation recensés à l'aide de statistiques descriptives a été réalisée sur le nombre d'événements par année, mais également sur le nombre d'événements par mois. Comme une mesure d'atténuation (opération de déglçage) a été instaurée à partir du printemps de 1976, nous avons divisé la série chronologique en deux soit, avant et après 1976. Cette division permet de réduire le biais que cette mesure d'atténuation induit dans la série chronologique ainsi que d'évaluer son efficacité. Des analyses de Chi-carré ont été utilisées afin d'établir si la différence entre ces deux groupes étaient significative sur le plan statistique.

Par la suite, un regroupement des événements d'inondation a été réalisé afin de représenter les événements pour la période hivernale (décembre, janvier et février) et la période printanière (mars, avril et mai). Ce regroupement a permis de représenter une période critique pour les inondations et où le nombre absolu d'inondations est plus important. Une analyse de Chi-carré a été pratiquée pour la période hivernale ainsi que la période printanière, et ce, pour les deux groupes identifiés pour toute la série afin d'évaluer l'efficacité des opérations de déglçage depuis son instauration en 1976. Par ailleurs, l'étude chronologique des données météorologiques a été réalisée à l'aide du test de tendance des séries chronologiques de *Mann-Kendall* sous *SYSTAT 12*. Cette analyse a pour but d'identifier une tendance dans les données suivant les énoncés des hypothèses nulles (H_0 , indiquant que la température moyenne est semblable tout au long de la période) ou alternatives (H_1 , indiquant que la température moyenne connaît une hausse ou une baisse durant la période analysée).

2.3. Résultats

2.3.1. Recension des évènements d'inondation

Plusieurs études ont démontré une tendance à l'augmentation de la fréquence des événements d'inondation depuis les 30 dernières années dans l'hémisphère nord et plus particulièrement dans les régions où le régime pluvionival domine (Bergeron *et al.*, 1997; Pachauri *et al.*, 2008; Saint-Laurent *et al.*, 2009). Pour vérifier si ces conditions sont également valides à l'embouchure de la rivière Saint-François, nous avons analysé les fréquences des inondations selon deux périodes distinctes, soit : avant et après l'instauration des opérations de déglacage qui ont débuté pour la première fois en mars/avril 1976 et qui se poursuivent toujours dans ce secteur. La fréquence relative des inondations par période de cinq ans entre 1865 et 2005 est présentée à la figure 2.2A. On remarque clairement la présence de deux périodes distinctes sur la série historique de 1865-2005, dont le point de rupture correspondant est centré sur les dates de 1975-1980.

Le premier groupe qui couvre la période de 1865 à 1975 illustre une fréquence relative plus faible que le deuxième groupe qui se situe entre 1975 et 2005. Après l'application du test de Chi-carré sur toute la série chronologique, une différence significative (valeur- $p = 0.0156$) entre les deux groupes ressort clairement (figure 2.2B).

Par ailleurs, la fréquence relative des inondations par mois est présentée à la figure 2.3 pour l'ensemble de la série chronologique. On y dénote que les inondations surviennent principalement durant le printemps (mars et avril), soit au moment du dégel du couvert de glace et de la débâcle de la rivière Saint-François. On observe également une augmentation de la fréquence des inondations en janvier, février, mars, juillet, novembre et décembre et une diminution pour le mois d'avril et mai pour le groupe 1975 à 2005. Un regroupement des événements d'inondation en deux catégories : (1) hiver (décembre, janvier et février) et (2) printemps (mars, avril et mai) a permis d'évaluer l'efficacité des opérations de déglacage en fonction de la saison. On aperçoit une légère diminution de la fréquence des inondations au printemps pour le groupe 1975 à 2005 contrairement à

l'hiver où l'on note une augmentation plus contrastée (figure 2.4). Un test de Chi-carré pour chacune des périodes confirme que l'augmentation de la fréquence relative observée à l'hiver est significative entre les deux groupes avec une valeur de 0.0009 (figure 2.5A). Également, les résultats obtenus pour le printemps démontrent que la diminution entre les deux groupes est significative sur le plan statistique avec une valeur de 0.0108 (figure 2.5B).

2.3.2. Variabilité climatique

L'analyse de la variabilité climatique par le test d'analyse de tendance des séries chronologiques montre une tendance significative à l'augmentation de la température minimum moyenne et une diminution des précipitations totales moyennes pour les mois de décembre à mai (tableau 2.2). Dans le cas du mois de décembre, il n'y a pas de tendances significatives à l'augmentation des températures minimums moyennes. Également, les mois d'avril et mai, ne démontrent pas de tendance significative pour la diminution des précipitations totales moyennes. Par contre, avec une valeur de 0.061 pour le mois d'avril, on peut constater que ce résultat se rapproche du seuil de 0.05 établi pour cette analyse.

2.3.3. Caractérisation de l'occupation du territoire

L'occupation du territoire a été caractérisée selon trois catégories pour cette étude soit, les surfaces agricoles, forestières et urbaines. La variabilité spatiale de l'étendue de chacun des types de surface entre 1928 et 2005 est présentée à la figure 2.6. On observe une diminution des superficies agricoles de 53 % à 39 % entre 1928 et 2005. L'effet inverse s'observe pour les surfaces forestières et urbaines avec des valeurs respectives de 27 % à 38 % et 3 % à 5 % durant la même période. Ces résultats ont été calculés à partir des polygones dressés de notre cartographie du territoire à l'aide des

photographies aériennes numérisées disponibles pour les différentes années (1928¹², 1964, 1979, 1998 et 2005), et ce, selon les trois catégories d'occupation du territoire établies (figures 2.6, 2.7 et 2.8).

2.4. Discussion

2.4.1. Recension des évènements d'inondation

L'inventaire des événements d'inondation a été réalisé à l'aide de divers documents comme des journaux, des rapports gouvernementaux et monographies régionales. Les données recueillies dans ces documents étaient principalement qualitatives, regroupant par exemple, un portrait sommaire des dommages causés aux infrastructures ainsi que le nombre de personnes affectées par les fortes crues ou inondations. Ce type de documentation est rarement utilisé dans les études hydrologiques courantes qui s'intéressent à la fréquence des inondations. Pourtant, ces données sont une source additionnelle pertinente pour compléter ou vérifier les données de nature hydrologique. D'ailleurs, des travaux récents portant sur la reconstitution des événements d'inondations des derniers siècles ont fait l'objet d'analyses approfondies en utilisant divers documents historiques (Benito *et al.*, 2004; Barrera *et al.*, 2006; Barriendos et Rodrigo, 2006). Dans ces études, les auteurs démontrent que les données historiques permettent souvent de compléter les données numériques et ainsi augmenter la couverture temporelle d'une série chronologique afin de pouvoir dégager des tendances d'occurrence des événements d'inondations. Il faut tout de même être conscient que ce type d'information relate la plupart du temps des événements exceptionnels ou ayant eu des conséquences sur la population ou les infrastructures. Il est certain que s'il n'y a

¹² Tel que mentionné dans la section matériels et méthodes, les cartes ne présentent pas les polygones obtenus pour l'année 1928, par contre on retrouve les valeurs de superficie obtenues pour cette année dans la figure 2.6.

aucun impact d'une inondation sur la population, il est moins probable que cet événement soit relaté dans les médias.

À la suite de l'exploration des données à l'aide de statistiques descriptives, nous avons observé une rupture dans la répartition des événements d'inondations sur une échelle temporelle. Afin de réduire les biais lors des analyses statistiques, nous avons divisé la série en deux groupes à partir de la date d'instauration des mesures de déglçage, soit 1976. Cette division concorde également avec la rupture observée dans nos données de récurrence des inondations. Les deux groupes ainsi formés correspondent à 1865-1975 et 1975-2005 respectivement. Cette division de la série chronologique a permis d'observer une fréquence plus importante des événements d'inondation après 1975. Par ailleurs, l'application des analyses de Chi-carré a permis de démontrer d'un point de vue statistique que cette augmentation des événements d'inondation était significative avec une valeur de 0.0156. D'autres études ont obtenu des résultats similaires dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Saint-Laurent et Hahni, 2008; Saint-Laurent *et al.*, 2009). D'ailleurs, la période ayant connu une hausse marquée des inondations couvre les années entre 1970-1990 pour un secteur plus en amont dans le bassin versant (Saint-Laurent *et al.*, 2009). Mais pourquoi observe-t-on une augmentation des événements d'inondation après 1975, alors qu'on pourrait penser que l'instauration des opérations de déglçage qui visent justement à réduire la fréquence des inondations aurait un impact direct sur la diminution de ce phénomène?

C'est en analysant les inondations par mois que l'on a pu constater que les inondations étaient plus fréquentes durant les mois de janvier, mars et avril. Cette observation concorde avec les caractéristiques du régime hydrologique du secteur d'étude décrit plus tôt. Également, en reportant la division en deux groupes, comme mentionnée précédemment, les mois de janvier, février, mars, juillet, novembre et décembre connaissent une augmentation du nombre d'inondation après 1975. En somme, la variabilité des événements d'inondation dans ce secteur, durant une année, est donc plus importante depuis 1975. Effectivement, ces événements d'inondation ne se produisent plus seulement au printemps comme auparavant. D'ailleurs, lors de l'analyse de nos

deux groupes par saison, on observe une augmentation durant l'hiver ainsi qu'une baisse durant le printemps des événements d'inondations. Cette diminution des événements d'inondation au printemps nous permet donc de constater que les opérations de déglacement sont efficaces pour cette période de l'année et que la problématique des inondations se manifeste plutôt durant l'hiver.

2.4.2. Variabilité climatique

Après avoir identifié la période hivernale comme étant la période connaissant une hausse des inondations, nous avons évalué l'influence des changements climatiques sur ce phénomène. Les analyses de tendances observées sur les variables climatiques ont révélé que les températures minimales moyennes pour les mois de janvier, février, mars, avril et mai étaient en hausse. Cette tendance a été observée par d'autres auteurs non seulement dans le bassin versant de la rivière Saint-François et au Québec, mais aussi dans d'autres travaux canadiens (Vincent et Mekis, 2006; Yagouti *et al.*, 2008; Saint-Laurent *et al.*, 2009). D'ailleurs, des études concernant les tendances climatiques du Canada et du Québec ont démontré une diminution de la fréquence des nuits froides, des jours froids ainsi que des jours de gel (Vincent et Mekis, 2006; Yagouti *et al.*, 2008). Nous pouvons donc conclure à la lumière de nos résultats sur les températures que l'hiver est beaucoup moins rigoureux aujourd'hui qu'au début du siècle.

L'influence des changements climatiques ne se limite pas à une hausse des températures; elle se traduit également en une perturbation de la dynamique des précipitations. Par exemple, Yagouti *et al.* (2008) révèlent que la fréquence des journées avec des précipitations a augmenté, mais que l'intensité des précipitations dans une journée ainsi que les jours consécutifs sans précipitations ont plutôt connu une diminution. De même, Saint-Laurent *et al.* (2009) ont démontré que durant la période 1950 à 1970 dans la région de Drummondville, les niveaux pluviométriques étaient aussi moins importants. Les résultats des analyses pour les précipitations dans notre étude nous ont montré une

tendance à la baisse pour les mois de décembre, janvier, février et mars. Pour ce qui est des mois d'avril et mai, cette tendance à la baisse ne ressort pas significativement sur le plan statistique, car la variabilité dans la série chronologique y était trop importante. Ces résultats nous révèlent donc une tendance à la diminution des quantités des précipitations en hiver et mars, concordant ainsi avec les études de Vincent et Mékis (2006). À la lumière de nos résultats, nous pouvons supposer que même si la quantité des précipitations démontre une tendance à la baisse, les précipitations sont plus fréquentes en conformité avec les résultats de Vincent et Mékis (2006). Il est possible également que ces précipitations soient plus fréquemment sous forme de pluies plutôt que de neige, en raison du réchauffement des températures. Ainsi, ces précipitations liquides ne peuvent s'infiltrer dans le sol durant cette saison de gel, et ont tendance à ruisseler en surface jusqu'au cours d'eau.

Tous ces facteurs nous amènent à croire que le couvert de neige puisse subir des modifications importantes au cours de l'hiver, favorisant sa fonte partielle durant certaines périodes. Cette fonte du couvert nival contribue à un apport en eau à la rivière gonflant son niveau et lorsque combiné à des épisodes de précipitations sous forme liquide, ce niveau devient critique voir même jusqu'au risque d'inondation. Également, la dynamique fluviale d'un cours d'eau est différente en hiver d'en été selon plusieurs études (Beltaos et Burrell, 2003; Andrishak et Hicks, 2008; Boucher *et al.*, 2009). Cette différence de l'hydrodynamique du cours d'eau peut ainsi occasionner un ralentissement de l'écoulement favorisant l'accumulation de la glace jusqu'à la formation d'un bouchon causant éventuellement une hausse du niveau d'eau et même une inondation.

2.4.3. Modifications de l'occupation du territoire

Après avoir observé et analysé la récurrence des inondations ainsi que la variabilité climatique, nous nous sommes intéressées à l'occupation du territoire et son impact sur la variabilité des événements d'inondations.

Tout d'abord, la caractérisation de l'occupation du territoire a été réalisée à partir de photographies aériennes dont certaines devaient être géoréférencées pour augmenter la précision de l'analyse. Cette procédure induit une certaine erreur dans notre image dont il faut tenir compte lors de la création des polygones associés à l'occupation du territoire. Cette erreur doit être réduite au minimum afin que la représentation des surfaces tracées puisse représenter au mieux la réalité du terrain. Rappelons que cette erreur peut varier entre 5 et 15 mètres, ce qui implique que le traçage des polygones doit tenir compte de cette marge d'erreur (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2007). Les polygones des différents modes d'occupation du territoire ainsi créés devaient nécessairement avoir une superficie supérieure à cette erreur afin d'obtenir des résultats valables. En fait, toutes ces transformations visent à cerner, le plus précisément possible, les changements d'occupation du territoire en terme de superficie, et dans un deuxième temps, à évaluer si ces changements peuvent avoir un impact, direct ou indirect, sur les conditions hydrodynamiques et la fréquence des inondations de notre secteur d'étude.

Il faut mentionner que plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence que pouvaient avoir les changements d'occupation du territoire sur la fréquence des inondations. Ils ont démontré que le type de couvert végétal influençait le ruissellement et la réponse hydrologique du cours d'eau lors de précipitations importantes (Rey *et al.*, 2004; Wissmar *et al.*, 2004; Limousin *et al.*, 2008; Toba et Ohta, 2008). D'ailleurs, Simard (1999) a illustré la différence de la propagation d'une onde de crue lors d'une averse avant et après l'urbanisation d'un territoire (figure 2.9). Également, l'étude de Wissmar *et al.* (2004) intègre des variables caractérisant l'utilisation du sol à un modèle hydrologique afin d'évaluer l'impact de ces variables sur le ruissellement. Cette étude démontre quelle proportion du couvert forestier dans un bassin influence le ruissellement des précipitations vers le cours d'eau faisant ainsi varier le débit de ce dernier (figure 2.10). Relativement à ces résultats, il établit un lien entre l'évolution du couvert forestier et la récurrence des débits lors d'événement d'inondation (figure 2.11). Cette figure représente l'augmentation du débit annuel d'un bassin versant ayant subi des

pertes de superficies forestières au profit de territoires urbanisés. Enfin, dans l'étude de Rey *et al.* (2004), ceux-ci indiquent que le ruissellement de surface sera absent sur un territoire ayant une couverture forestière supérieure à 70 %, pourvu que le sol ne soit pas saturé en eau. Alors, avec un pourcentage de couverture forestière plus faible que 70 %, l'eau de pluie tend à ruisseler en surface puisque l'absorption du couvert végétal est faible. Aussi, selon que la dispersion de la couverture végétale soit homogène ou pas, ce ruissellement sera diffus ou pas. En d'autres termes, on peut penser que l'augmentation des superficies forestières peut avoir un effet notable sur la diminution des inondations étant donné que la reforestation du territoire engendre le plus souvent une diminution du ruissellement de surface et, parallèlement, une diminution de l'écoulement en rivière (Rey *et al.*, 2004; Wissmar *et al.*, 2004). Dans notre cas, il semble que d'autres facteurs interviennent puisqu'on observe, au contraire, une augmentation des inondations depuis 1975, malgré la reprise du couvert forestier. Il faut dire toutefois que cette reprise forestière reste marginale, car seulement 38 % du territoire d'étude est couvert par des surfaces forestières. Finalement, la plupart des terres ayant connu une reforestation, après une déprise agricole par exemple, se retrouvent plutôt loin des rives de la rivière Saint-François, ce qui peut réduire l'effet souhaité, soit diminuer le ruissellement de surface.

2.5. Conclusion

Cette étude porte sur l'évolution des événements d'inondation, et ce, en lien avec les changements climatiques et les modifications anthropiques entre 1865 et 2005 à l'embouchure de la rivière Saint-François. Le choix de ce territoire s'explique en raison du nombre élevé d'inondations qui s'y produisent et de leurs effets sur la population. Les inondations surviennent principalement au printemps lors de la fonte du couvert de neige avec la formation d'embâcles, augmentant ainsi le niveau d'eau et provoquant dans bien des cas des débordements. Également, la géomorphologie et les infrastructures dans ce secteur favorisent le développement et la formation d'importantes couvertures de glace

qui au dégel forment des embâcles qui ralentissent le courant et contribuent à l'augmentation du niveau d'eau jusqu'à des seuils critiques et même au-delà. Avec l'analyse des données d'inondations, on remarque que leur fréquence est en hausse depuis 1975, et ce, malgré l'instauration des opérations de déglacage qui ont débuté en 1976 par la Garde côtière canadienne. On note aussi que les inondations se produisent plus souvent en hiver depuis le début des années 1970, ce qui suggère un changement marqué des conditions hydrodynamiques depuis cette période. Par ailleurs, le printemps connaît plutôt une diminution des événements d'inondation attribuable à l'instauration des opérations de déglacage. C'est en analysant la tendance des variables climatiques que l'on observe un réchauffement des températures minimums et une diminution des précipitations totales durant les mois d'hiver et du printemps. Ce réchauffement des températures permet d'expliquer la hausse des inondations durant l'hiver par la fonte partielle du couvert de neige ainsi que par une modification des précipitations qui tombent plus fréquemment sous forme de pluie que de neige, entraînant un apport d'eau plus important au cours d'eau. Enfin, l'évaluation des modifications de l'occupation du territoire a permis de déterminer une progression des aires forestières entre 1928 et 2005 qui se manifeste par une reforestation de 11 % du territoire d'étude au détriment du territoire agricole qui connaît une réduction de ces surfaces de 14 % au total. Par contre, cette hausse des surfaces forestières ne semble pas avoir un impact significatif pour la réduction des inondations, car elle se trouve en deçà du seuil de 70 % qui est jugé comme un seuil minimal pour observer des changements des conditions hydrodynamiques. Également, l'augmentation de ces surfaces forestières s'effectue plutôt à l'intérieur des terres plutôt que le long des berges, ce qui peut réduire son efficacité pour diminuer l'effet de ruissellement. On peut penser toutefois qu'avec la déprise agricole qui se produit dans la région, les aires forestières vont continuer à augmenter et se densifier, menant sans doute à une diminution du ruissellement de surface et conséquemment à une diminution des risques d'inondations. Pour conclure, l'analyse de l'ensemble des données recensées nous permet de constater que les changements climatiques, notamment le réchauffement des températures ont un impact

direct sur la fréquence des inondations et que ce phénomène du réchauffement climatique est en progression, ce qui signifie une modification profonde des conditions hydrodynamiques actuelles qui auront, à leur tour, une conséquence directe sur les risques d'inondations de ce secteur de la rivière Saint-François.

REMERCIEMENTS

Les auteures tiennent à remercier le Centre Interuniversitaire d'Études Québécoises (CIEQ) pour l'accès à ses bases de données. Également, nous tenons à remercier le Capitaine Steven D. Neatt de Pêche et Océan Canada pour ses informations concernant les opérations de déglacement.

BIBLIOGRAPHIE

- Andreassian (2004). "Forest cover and watershed hydrological behaviour." Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau(2): 31-35.
- Andrishak et Hicks (2008). "Simulating the effects of climate change on the ice regime of the Peace River." Canadian Journal of Civil Engineering **35**(5): 461-472.
- Barrera, *et al.* (2006). "Estimation of extreme flash flood evolution in Barcelona County from 1351 to 2005." Natural Hazards and Earth System Sciences **6**(4): 505-518.
- Barriendos et Rodrigo (2006). "Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **51**(5): 765-783.
- Base National de Données Topographiques (2000). Données géospatialisées, Ressources naturelles Canada.
- Beltaos (2008). "Progress in the study and management of river ice jams." Cold Regions Science and Technology **51**(1): 2-19.
- Beltaos et Burrell (2003). "Climatic change and river ice breakup." Canadian Journal of Civil Engineering **30**(1): 145-155.
- Beltaos et Carter (2009). "Field studies of ice breakup and jamming in lower Peace River, Canada." Cold Regions Science and Technology **56**(2-3): 102-114.
- Benito, *et al.* (2004). "Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods." Natural Hazards **31**(3): 623-643.
- Bergeron et Direction générale des eaux (1977). Hydrométéorologie : service de la météorologie : bassin versant de la Saint-François. Québec ;, Ministère des richesses naturelles.
- Bergeron, *et al.* (1997). Chapitre de l'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement du climat : tome V. Ottawa, On, Environnement Canada.
- Bonsal et Prowse (2003). "Trends and variability in spring and autumn 0 degrees C-isotherm dates over Canada." Climatic Change **57**(3): 341-358.

- Boucher, *et al.* (2009). "Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed." Geomorphology **108**(3-4): 273-281.
- Bryant et Gilvear (1999). "Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland." Geomorphology **29**(3-4): 307-321.
- Camorani, *et al.* (2005). "Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems." Physics and Chemistry of the Earth **30**(8-10): 561-574.
- Chase, *et al.* (2000). "Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter." Climate Dynamics **16**(2-3): 93-105.
- Chaumont (2004). "Variabilité et extrêmes climatiques au Canada, revue de littérature." Rapport Ouranos **OUR-101**.
- COGESAF (2006). Analyse du bassin versant de la rivière Saint-François: 255.
- Environnement Canada (2005). HYDAT.
- Environnement Canada (2007). Données climatiques quotidiennes du Canada (DCQC).
- Ferreira, *et al.* (2005). "Changes in Riparian woods over space and time: Influence of environment and land use." Forest Ecology and Management **212**(1-3): 145-159.
- Gélinas et Direction générale des eaux (1977). Caractéristiques physiques : bassin versant de la Saint-François. Québec, Ministère des richesses naturelles.
- Hicks (2009). "An overview of river ice problems: CRIPE07 guest editorial." Cold Regions Science and Technology **55**(2): 175-185.
- Jasek (2003). "Ice jam release surges, ice runs, and breaking fronts: field measurements, physical descriptions, and research needs." Canadian Journal of Civil Engineering **30**(1): 113-127.
- Jones, *et al.* (1999). "Surface air temperature and its changes over the past 150 years." Reviews of Geophysics **37**(2): 173-199.
- Kestens (2000). Les conséquences de la déforestation sur le cycle hydrologique : une étude de cas, bassin versant de la Haute Srepok, Vietnam.

- Lee et Heaney (2003). "Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems." Journal of Water Resources Planning and Management-Asce **129**(5): 419-426.
- Limousin, *et al.* (2008). "Modelling rainfall interception in a Mediterranean Quercus ilex ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment." Journal of Hydrology **357**(1-2): 57-66.
- McCormack et Québec (Province). Service des eaux souterraines. (1979). Etude hydrogéologique du bassin de la Saint-François. Québec, Ministère des richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service des eaux souterraines.
- Mekis et Hogg (1999). "Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series." Atmosphere-Ocean **37**(1): 53-85.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2007). Instructions pour la confection des plans généraux d'aménagement forestier 2008-2013 (Annexes et bibliographie). Direction de l'aménagement des forêts publiques et privées. Québec.
- Mitchell et Jones (2005). "An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids." International Journal of Climatology **25**(6): 693-712.
- New, *et al.* (1999). "Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology." Journal of Climate **12**(3): 829-856.
- New, *et al.* (2000). "Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate." Journal of Climate **13**(13): 2217-2238.
- New, *et al.* (2001). "Precipitation measurements and trends in the twentieth century." International Journal of Climatology **21**(15): 1889-1922.
- Pachauri, *et al.* (2008). "Climate change 2007 synthesis report." from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
- Primeau et Direction de la qualité des cours d'eau (1992). Qualité des eaux du bassin de la rivière Saint-François, 1976 à 1991. Québec, Ministère de l'environnement, Direction de la qualité des cours d'eau.
- Rey, *et al.* (2004). "Role of vegetation in protection against surface hydric erosion." Comptes Rendus Geoscience **336**(11): 991-998.

- Saint-Laurent (2001). "Spatio-Temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada." Environments **29**(2): 73-89.
- Saint-Laurent et Hahni (2008). "Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada)." Environnement Urbain **2**: a50-a72.
- Saint-Laurent, *et al.* (2009). "Hydroclimatic variability and relation with flood events (Southern Québec, Canada)." Water Resources **36**(1): 43-56.
- Seidel, *et al.* (2009). "Potential of historical meteorological and hydrological data for the reconstruction of historical flood events - the example of the 1882 flood in southwest Germany." Natural Hazards and Earth System Sciences **9**(1): 175-183.
- Simard (1999). Proposition de mesures à adopter pour réduire les risques inhérents à d'éventuelles inondations catastrophiques de la rivière Saint-François à Sherbrooke.
- Toba et Ohta (2008). "Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model." Hydrological Processes **22**(14): 2634-2643.
- Tramblay, *et al.* (2005). Variabilité et extrêmes de température et de précipitation entre 1941 et 2000 : le cas du golfe du fleuve Saint-Laurent. [Québec], INRS-ETE.
- Vincent et Mekis (2006). "Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century." Atmosphere-Ocean **44**(2): 177-193.
- Whitfield (2001). "Linked hydrologic and climate variations in British Columbia and Yukon." Environmental Monitoring and Assessment **67**(1-2): 217-238.
- Wissmar, *et al.* (2004). "Effects of changing forest and impervious land covers on discharge characteristics of watersheds." Environmental Management **34**(1): 91-98.
- Yagouti, *et al.* (2008). "Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Quebec, 1960-2005." Atmosphere-Ocean **46**(2): 243-256.
- Zhang, *et al.* (2001). "Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada." Journal of Climate **14**(9): 1923-1936.

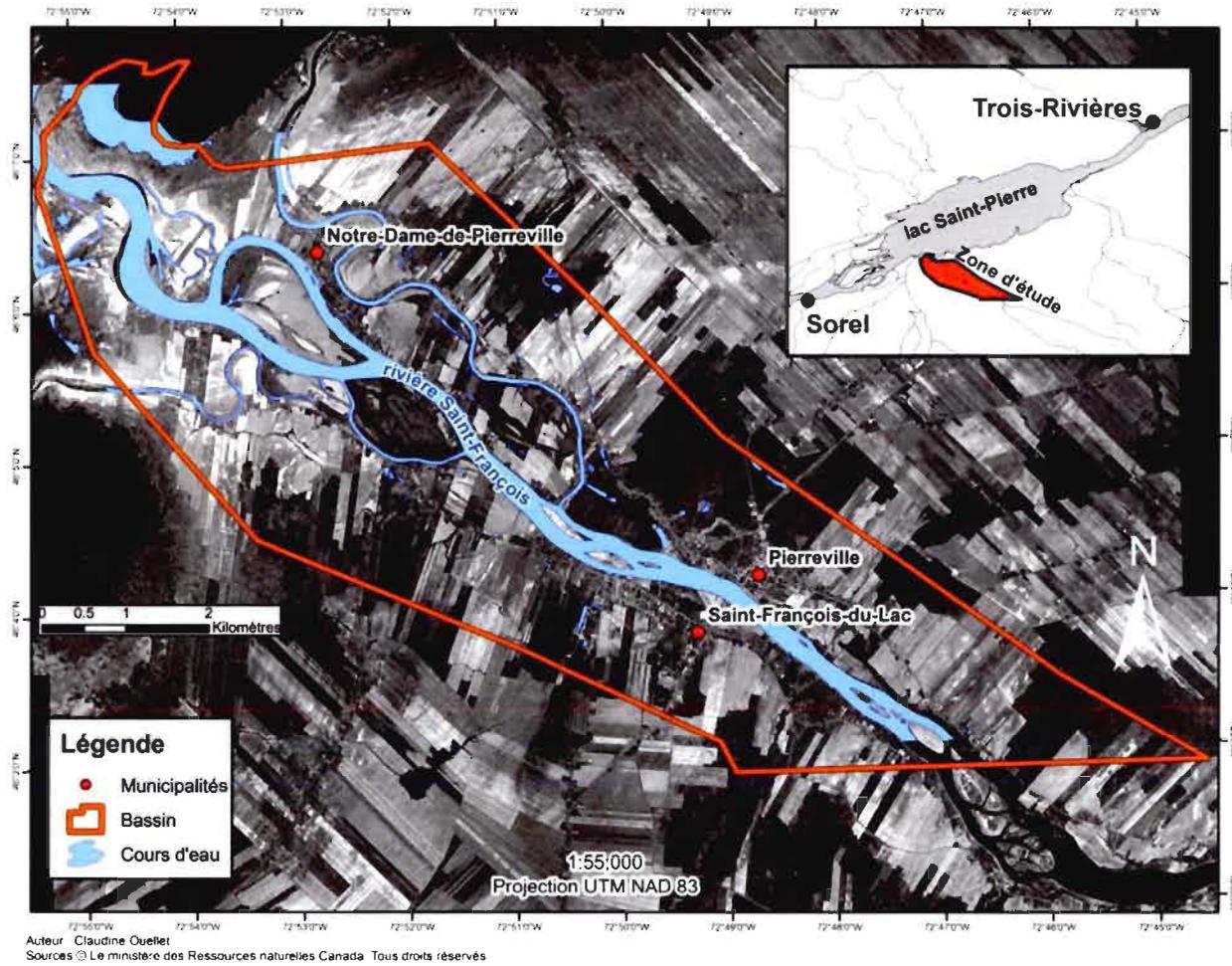


Figure 2.1 Délimitation de la zone d'étude à l'embouchure de la rivière Saint-François

Tableau 2.1 Coefficients de détermination et valeurs de p des régressions pour les différentes variables climatiques pour la modélisation de la station de Pierreville à partir des stations voisines

Variables	Station Référence	r^2	p
Température Maximum	Nicolet	0.9906	< 0.0001
Température Minimum	Drummondville	0.9964	< 0.0001
Température Moyenne	Nicolet	0.9973	< 0.0001
Pluie	Nicolet	0.8551	< 0.0001
Neige	Sorel	0.925	< 0.0001
Précipitation Totale	Nicolet	0.756	< 0.0001

Tableau 2.2. Erreur RMS obtenue lors du géoréférencement des photographies aériennes de 1928, 1964 et 1979

Années	Images	Points de contrôle	x RMS	y RMS
1928	3	58	14.55	12.54
1964	31	190	4.49	5.87
1979	26	221	6.17	6.89

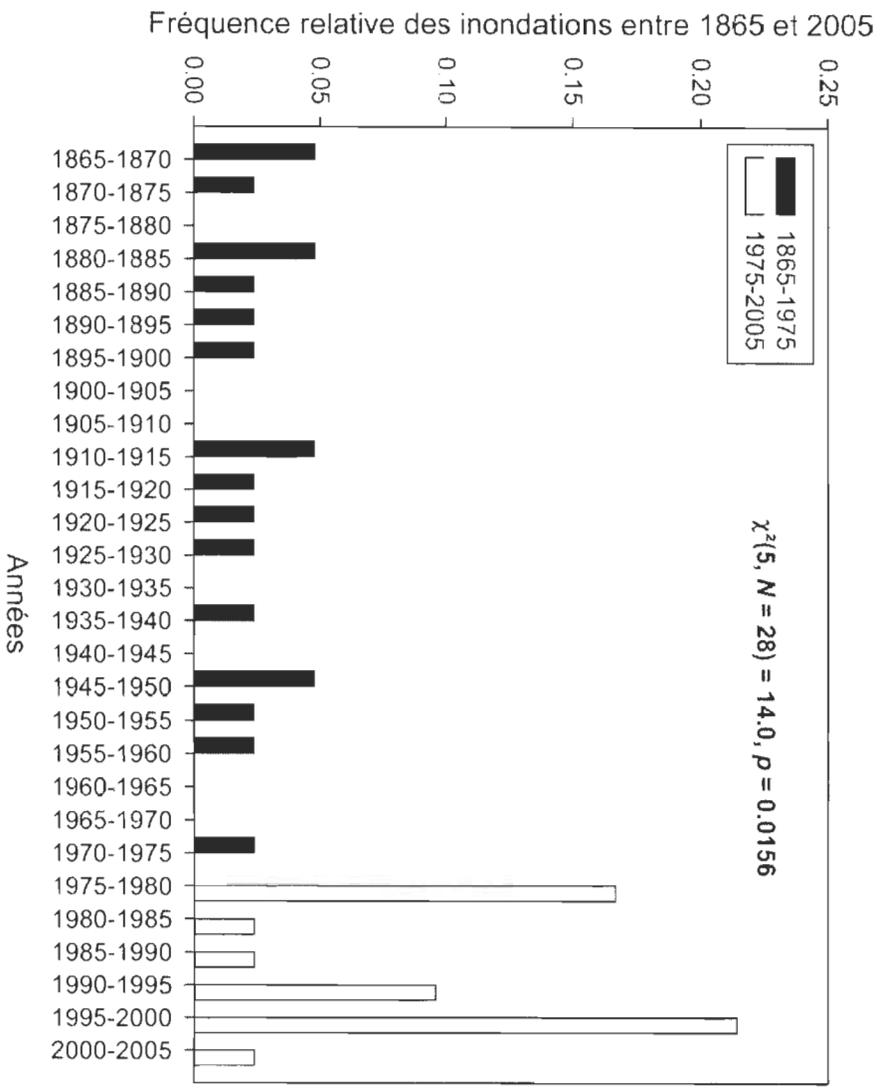


Figure 2.2. Fréquence relative des inondations entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Résultat du test de Chi-carré pour les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005)

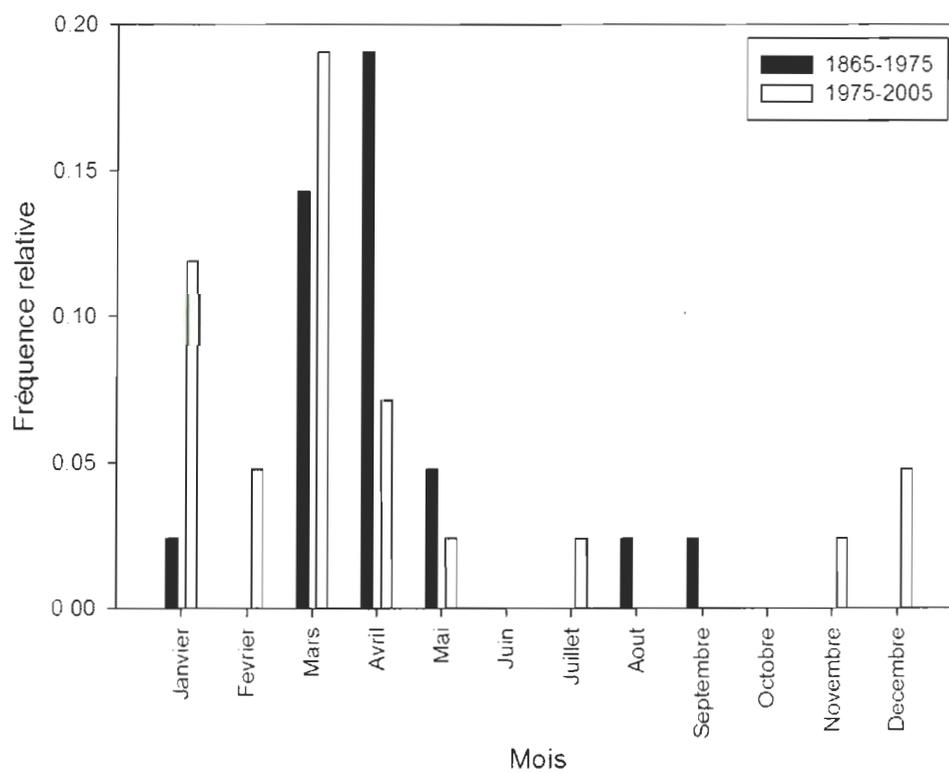


Figure 2.3 Fréquence relative des inondations par mois entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude pour les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005)

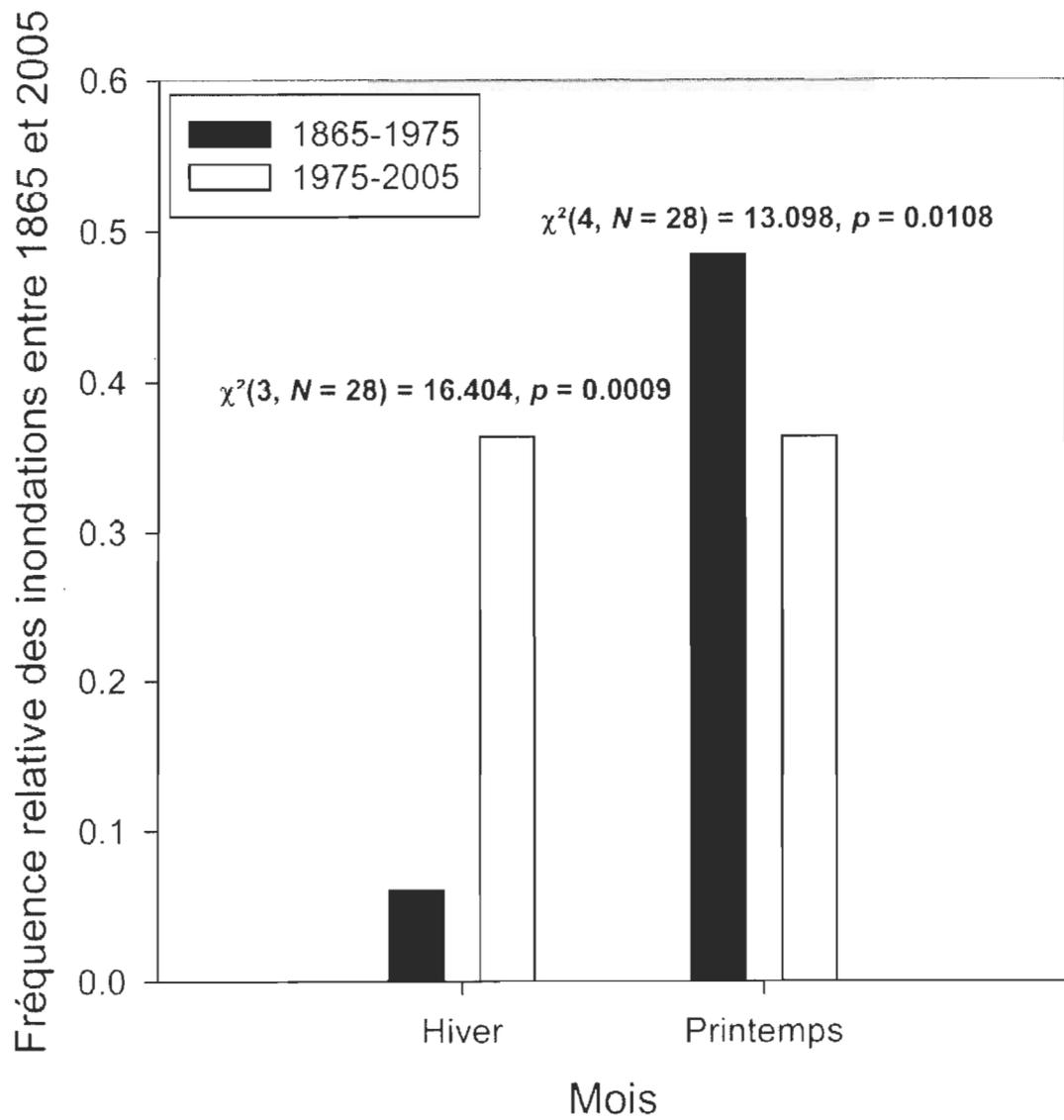


Figure 2.4 Fréquence relative des inondations pour l'hiver et le printemps entre 1865 et 2005 dans la zone d'étude. Résultats du test de Chi-carré pour l'hiver et le printemps selon les deux groupes (1865-1975 et 1975-2005)

Tableau 2.3 Analyse de tendance des mois d'hiver et du printemps pour les variables de température minimum et précipitation totale dans la zone d'étude. Les valeurs en gras étant significatives.

Variable	Température min.	Précipitation totale
Mois	p-value	p-value
Décembre	0.143	0.017
Janvier	0.034	0.000
Février	0.002	0.000
Mars	0.005	0.004
Avril	0.000	0.061
Mai	0.044	0.492

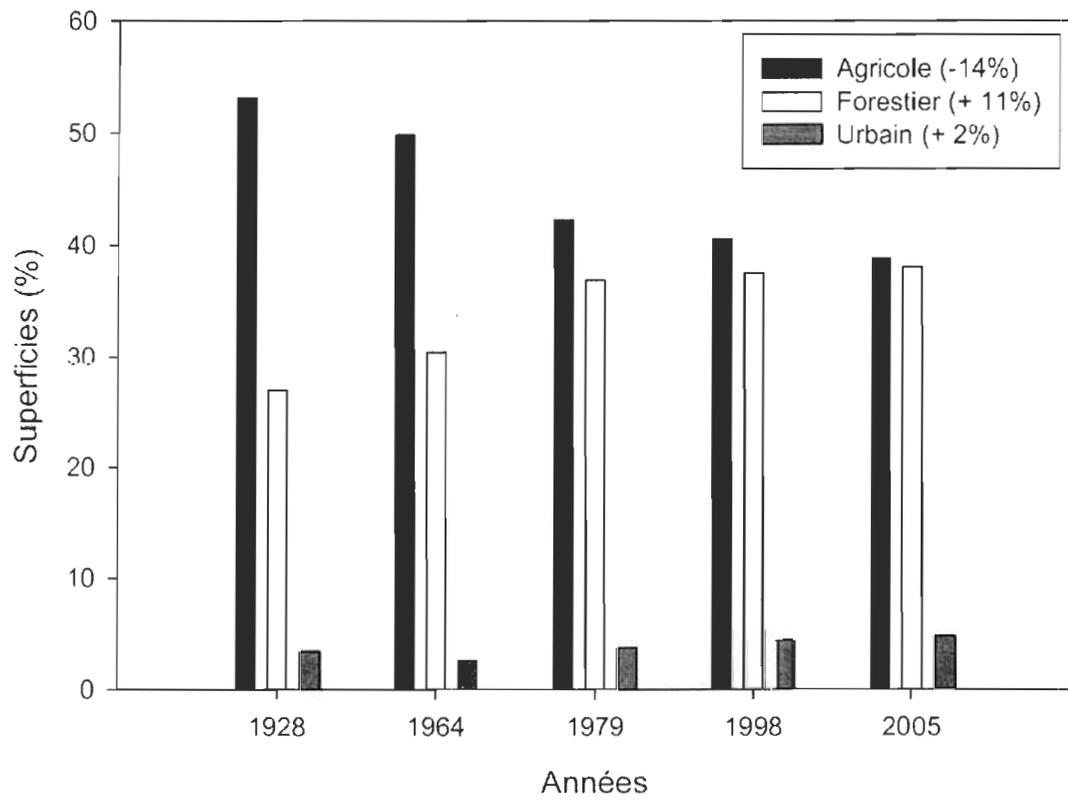


Figure 2.5 Pourcentage de superficies couvertes selon trois catégories (agricole, forestier, urbain). Les valeurs dans la légende indiquent la variation des superficies entre 1928 et 2005

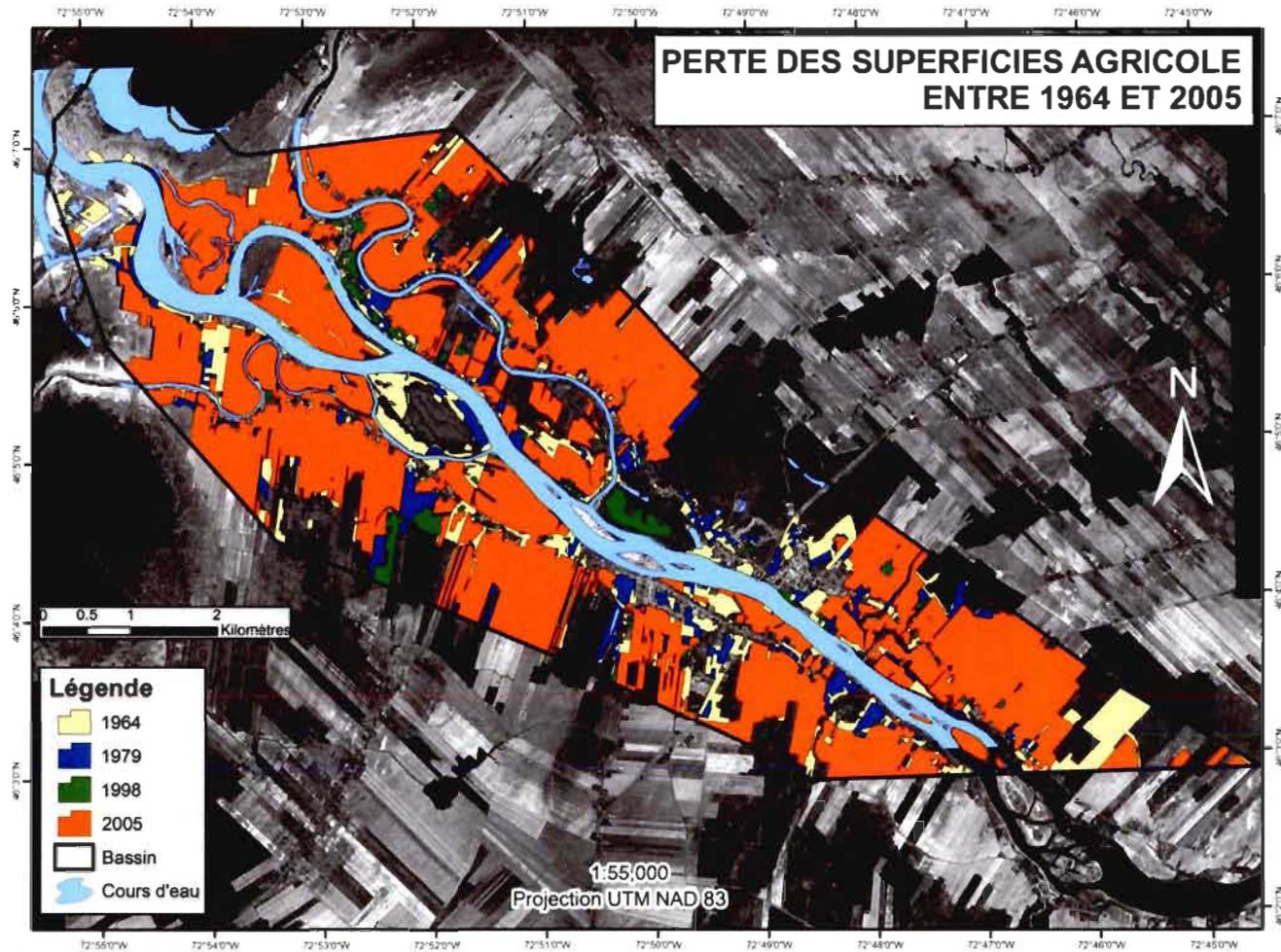


Figure 2.6 Évolution des superficies agricoles entre 1964 et 2005

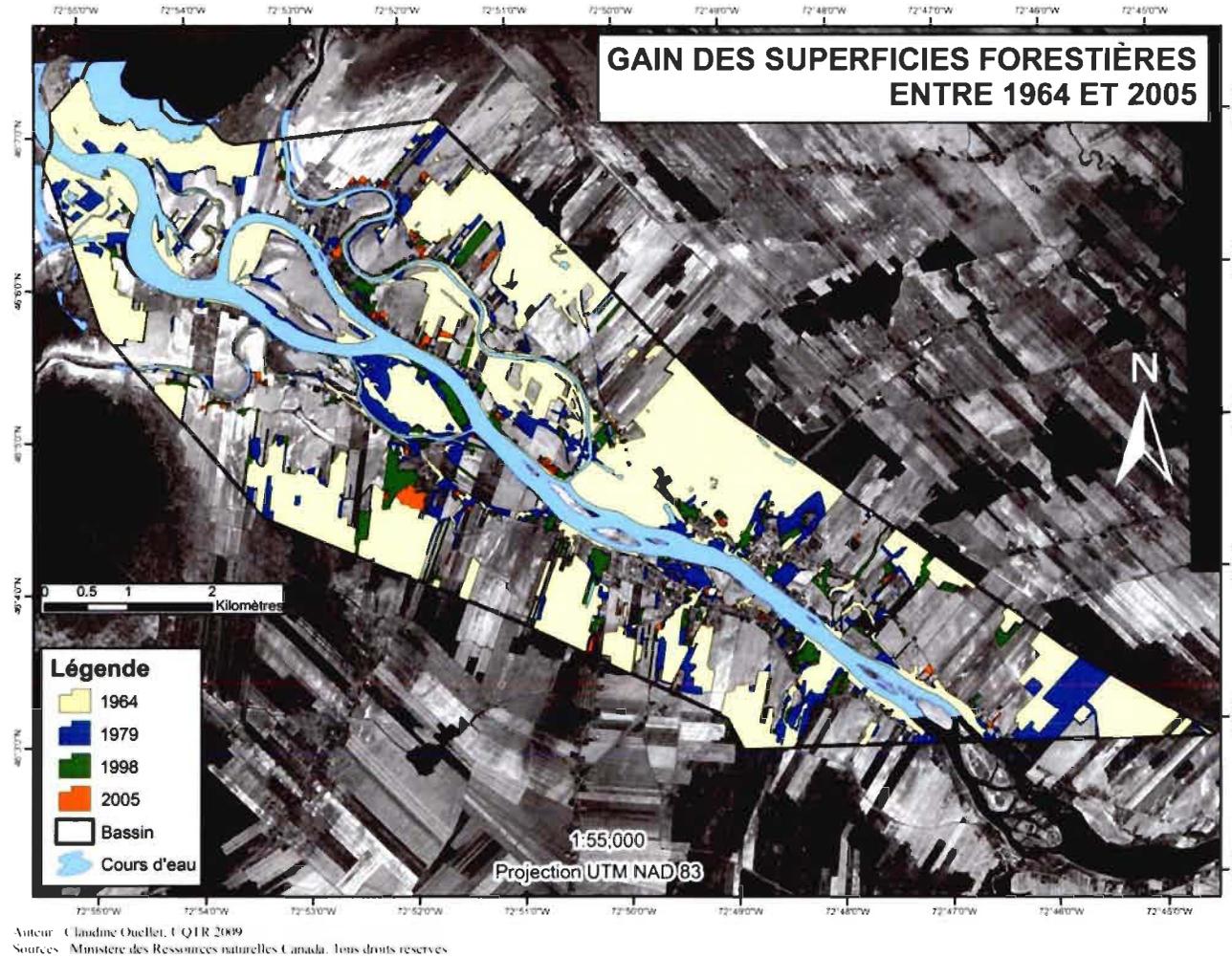


Figure 2.7 Évolution des superficies forestières entre 1964 et 2005

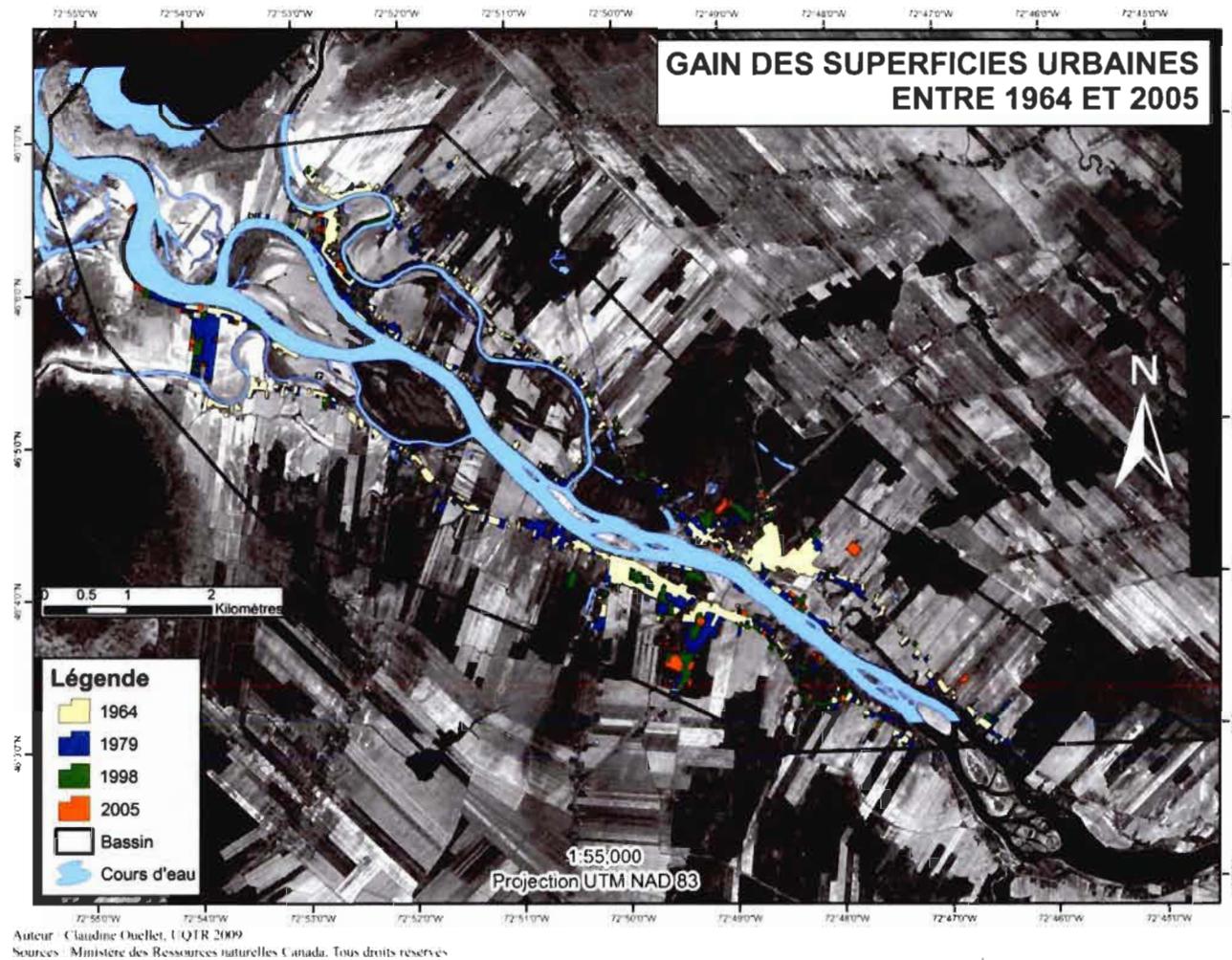


Figure 2.8 Évolution des superficies urbaines entre 1964 et 2005

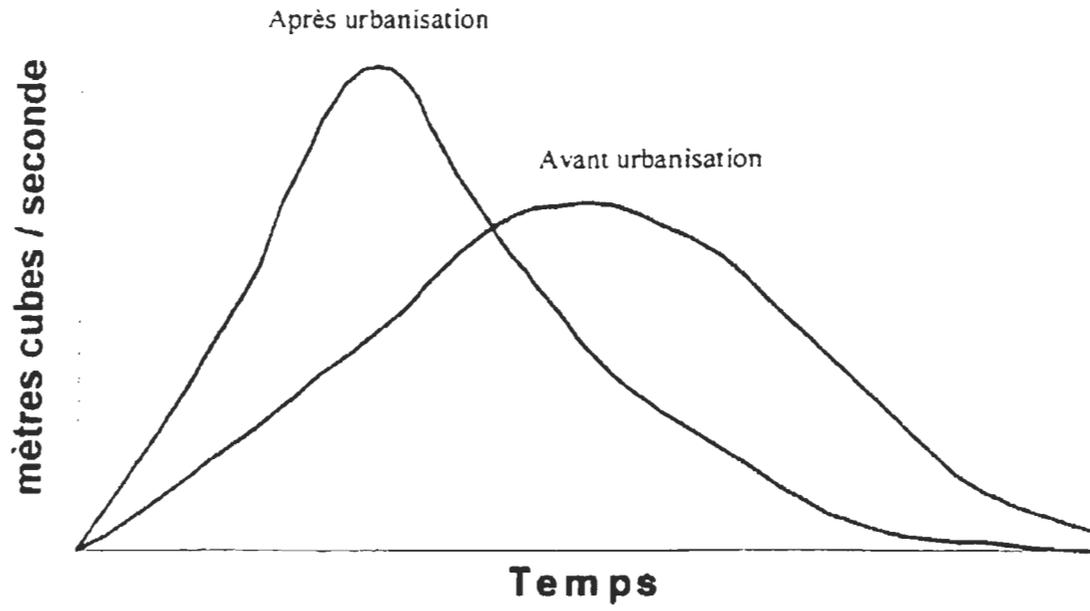


Figure 2.9 Propagation d'une onde de crue lors d'une averse après l'urbanisation d'un territoire (Tiré de Simard, 1999)

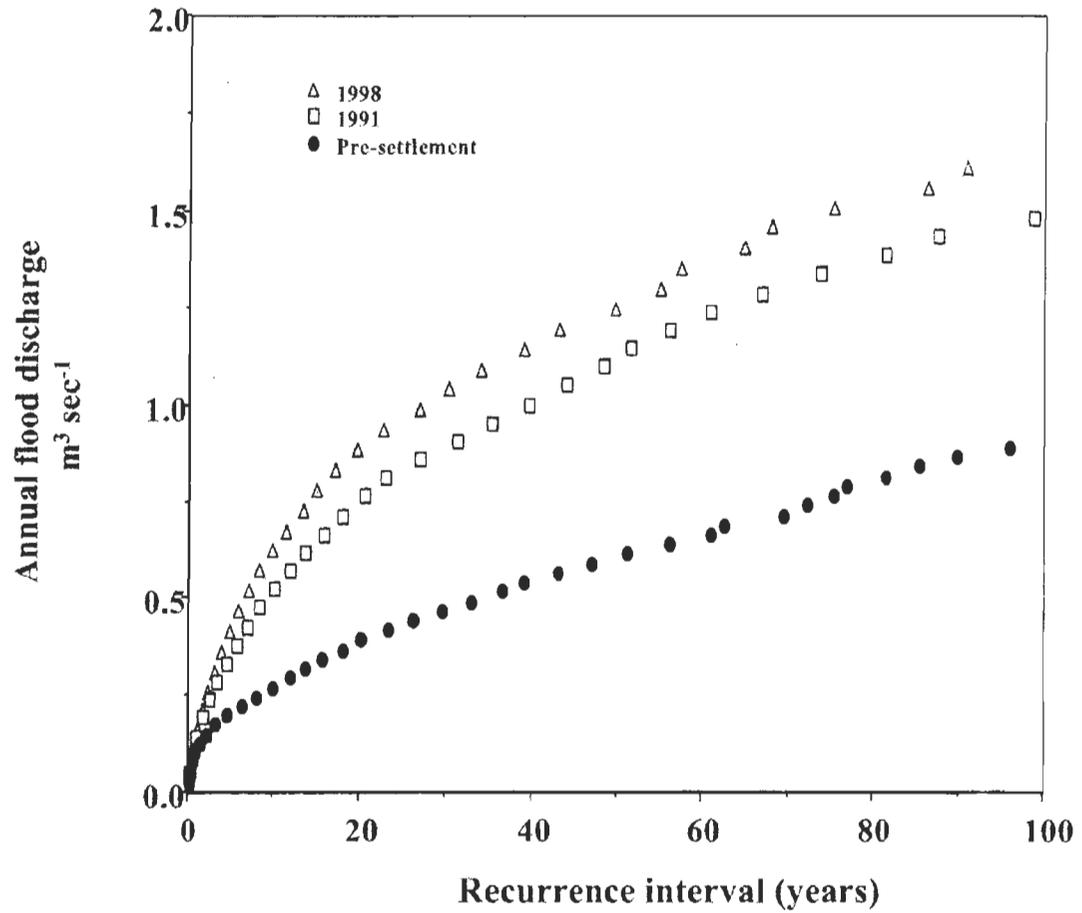


Figure 2.10 Simulated flood-frequency curves ($\text{m}^3/\text{sec}^{-1}$) for Maplewood Creek. Flood-frequency curves indicate the annual flood discharge rates for 1991 and 1998 exceed presettlement discharge rates (Tiré de Wissmar et al., 2004)

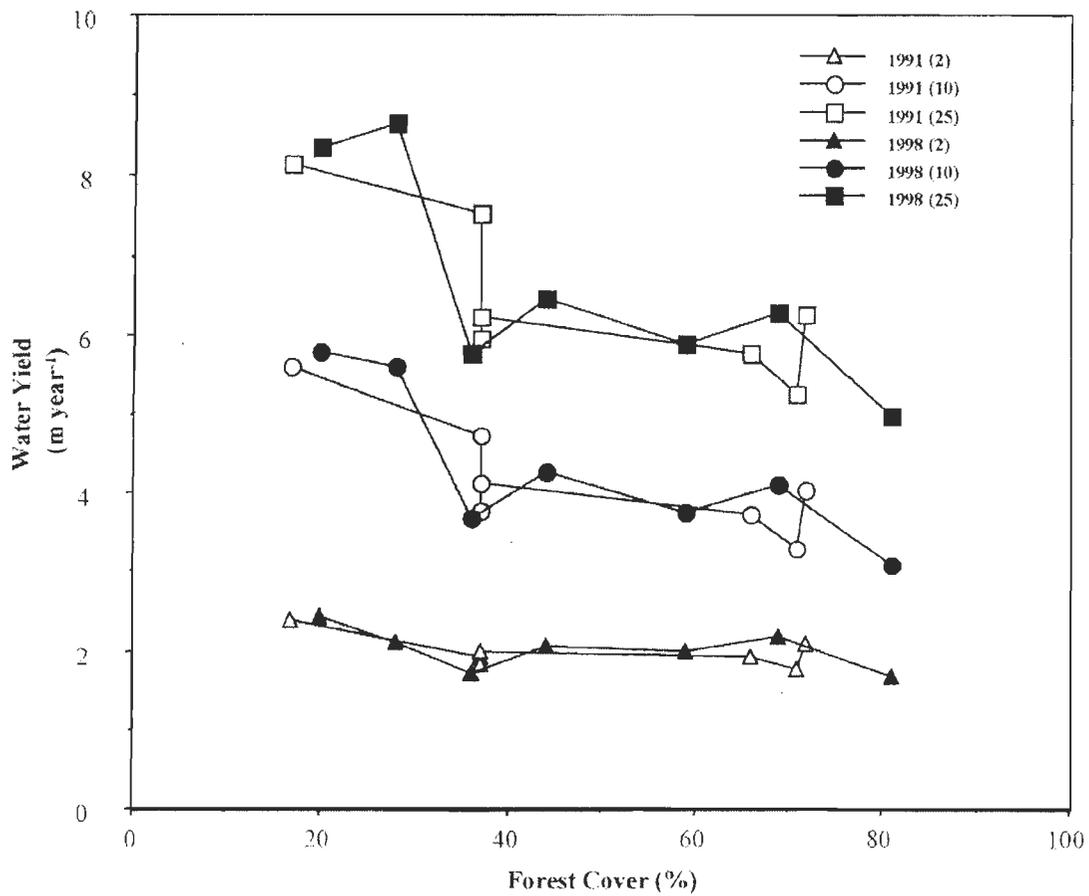


Figure 2.11 Normalized flows (m yr⁻¹) as function of the forest canopy cover (percent of watershed area) during 1991 and 1998. Flows and forest cover for urban and rural watersheds in the lower Cedar River (Tiré de Wissmar et al., 2004)

ANNEXE A

Guide de présentation d'un manuscrit

En avril 1977, les *Cahiers de géographie de Québec* (vol. 21, n° 52) publiaient le **Guide de présentation d'un manuscrit** préparé par Luc Bureau, alors rédacteur. Ce guide, établi sur la base des numéros déjà publiés et des règles générales de la langue et de la typographie, permettait aux *Cahiers* d'arrêter et surtout de communiquer leurs propres règles de présentation qui devaient faciliter grandement le travail de la Rédaction. Les auteurs étaient alors invités à suivre ces règles dans la préparation de leur texte pour « soumettre des manuscrits dignes de la compétence et du sérieux que commande l'exercice de leur discipline » (p. 5). La rédaction disposait dès lors d'un critère de base pour juger de la qualité de présentation des manuscrits qui lui étaient soumis et elle pouvait ainsi retourner les textes qui s'écartaient trop des règles en demandant à l'auteur de s'y conformer. Un exemplaire du Guide était joint à l'envoi.

Quinze ans après la publication de l'indispensable Guide, la qualité de la présentation des manuscrits soumis aux *Cahiers* s'est grandement améliorée; la proportion des textes retournés pour « non-conformité » reste faible. Pour maintenir cette qualité, la Rédaction a jugé à propos de préparer une nouvelle version du Guide en tenant compte des changements dans les règles de présentation, découlant de l'évolution de la pratique, des exigences de la micro-informatique et de la nouvelle maquette typographique que présentent les *Cahiers* depuis avril 1991 (vol. 35, n° 94). Ce « nouveau » guide reprend dans une très large mesure les éléments contenus dans celui préparé par Luc Bureau. Il en respecte l'esprit et en suit souvent la lettre. Il constitue en quelque sorte une mise à jour des règles de présentation actuellement en vigueur aux *Cahiers*.

Tables des matières

1. Directives générales
2. Citations et appels de références bibliographiques
 - 2.1 Notes
 - 2.2 Bibliographie
 - 2.3 Tableaux
 - 2.4 Illustrations

- 3. Quelques règles typographiques
 - 3.1 Signes de ponctuation et espacements
 - 3.2 Nombres
 - 3.3 Abréviations
 - 3.4 Toponymes
 - 3.5 Capitale ou bas de casse?
- 4. Sources utiles

1. DIRECTIVES GÉNÉRALES

Communication

La lettre accompagnant le manuscrit proposé doit préciser, dans les cas où il y a plus d'un auteur, le nom de la personne avec laquelle la Rédaction doit communiquer. À cette fin, on indiquera l'adresse postale et les numéros de téléphone et de télécopieur), ainsi que l'adresse électronique.

Dactylographie

Le texte est présenté à double interligne avec des marges de 3 cm au recto de feuilles de format lettre ou A4. Il est conseillé d'utiliser une fonte courante (Times, Helvetica, Palatino, etc.) et un caractère léger. Le manuscrit ne doit pas excéder 25 pages (40 000 signes) pour un article et 12 pages (20 000 signes) pour une note (avec les résumés, les illustrations et la bibliographie).

Exemplaires

Le manuscrit est soumis en cinq exemplaires sur papier blanc.

Disquette

L'envoi d'une disquette contenant une copie du manuscrit est nécessaire seulement après l'acceptation finale. Toutefois, lors de la préparation de leur texte, les utilisateurs de la micro-informatique sont invités à éviter toute opération automatique (appels de notes et notes, majuscules, tables des matières, etc.) susceptible d'occasionner des pertes d'information lors de la conversion des fichiers.

Page-titre

Pour la page-titre, on suivra le modèle suivant:

Titre : Quoi publier?

Auteurs : Élise Recluse et Mariane Lafrance

Institution : Département de géographie, Université Laval, courriel

Page des résumés

La deuxième page du manuscrit est réservée aux résumés français et anglais (pas plus de 150 mots chacun), aux mots-clés français et anglais (de quatre à huit) et à la traduction du titre (en anglais pour les textes français et en français pour les textes anglais).

Première page de texte

La première page de texte reprend le titre du manuscrit sans le nom de l'auteur.

Remerciements

Les remerciements, s'il y a lieu, sont regroupés sous ce titre, sur une page distincte placée à la fin du manuscrit.

Divisions du texte

La division entre les parties du texte suit une hiérarchisation fondée sur l'utilisation des capitales, des bas de casse (minuscules) et des diverses faces (romain, italique, léger, gras). Les divisions sont justifiées à gauche et adoptent le modèle suivant :

PREMIER DEGRÉ (capitales et gras)

DEUXIÈME DEGRÉ (capitales et léger)

Troisième degré (capitale initiale, bas de casse et gras)

Quatrième degré (capitale initiale et italique léger)

2. CITATIONS ET APPELS DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les citations doivent toujours être placées entre des guillemets français (« citation », avec espace insécable après le guillemet ouvrant et avant le guillemet fermant) ou anglais (“quotation” sans espace intérieur) selon la langue du manuscrit et ce, indépendamment de la langue de la citation. Les citations de plus de cinq lignes sont composées en retrait par rapport au corps du texte, sans guillemets.

La référence bibliographique suit immédiatement le guillemet indiquant la fin de la citation mais avant le point de terminaison de la phrase. Elle comporte le nom de famille de l'auteur, l'année de publication et la page, le tout entre parenthèses. « Si la bonne présentation d'un texte n'est pas garante de sa valeur scientifique, elle n'en contribue pas moins à le rendre plus solide et attrayant » (Bureau, 1977:5). Dans le cas des références bibliographiques sans citation, l'usage varie :

La présentation d'un manuscrit, sans garantir sa qualité scientifique, le rend plus agréable à lire (Bureau, 1977:5).

Selon Bureau (1977:5), la présentation d'un manuscrit, sans garantir sa qualité scientifique, le rend plus agréable à lire.

L'usage des expressions idem et ibidem (ibid.) évite de répéter la référence bibliographique, mais seulement dans les cas où les renvois se suivent immédiatement. L'emploi de idem suivi du folio de la page se rapporte à l'ouvrage cité immédiatement avant, mais à une page différente, alors que ibid. renvoie au même ouvrage et à la même page. Tout comme les renvois complets, ces expressions sont placées entre parenthèses après la citation et avant le point.

2.1 Notes et appels de notes

Les auteurs sont invités à éviter l'emploi des notes. Si ce procédé est indispensable, l'appel de chaque note se fera dans le texte à l'aide d'un chiffre arabe en position supérieure (exposant) placé idéalement à la fin de la phrase, avant le point (par exemple⁶). Les notes sont regroupées à la fin du manuscrit, avant la bibliographie. En aucun cas les notes ne doivent servir à donner une référence bibliographique qu'il est possible d'indiquer directement dans le texte.

2.2 Bibliographie

Voici le protocole à employer pour la bibliographie :

Livre (un auteur)

GEORGE, Pierre (1989) Les hommes sur la terre. La géographie en mouvement. Paris, Seghers.

Livre (deux auteurs)

FERRAS, Robert et VOLLE, Jean-Paul (1990) Languedoc-Roussillon. Région de la France du Sud et de l'Europe du Nord. Montreuil, Bréal éditions (Coll. « Histoire et géographie économiques »).

Livre (plus de deux auteurs)

BRUNET, Roger et al. (1988) Montpellier Europole. Montpellier, GIP RECLUS.

Ouvrage collectif

COLLECTIF (1989) La ville et le fleuve. Paris, Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, Actes du 112e Congrès national des Sociétés savantes.

Recueil de texte

SÉNÉCAL, Gilles, éd. (1988) Territoires et minorités. De l'Amérique française au lac Meech. Montréal, Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (Coll. « Les Cahiers scientifiques », n° 65).

KLEIN, Juan-Luis et MALTAIS, Bernard, éd. (1989) *Le récréo-tourisme. Une nouvelle voie de développement*. Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, module de géographie et Association professionnelle des géographes du Québec.

Publication gouvernementale

QUÉBEC, Commission de toponymie (1987) *Répertoire toponymique du Québec*, 1987. Québec, Les publications du Québec.

Thèse

CLICHE, Pierre (1977) *Géographie de la pauvreté au Québec*. Québec, Université Laval, Département de géographie, thèse de doctorat non publiée.

Article (provenant d'un périodique)

RIVIÈRE D'ARC, Hélène (1989) *La gestion socialiste du territoire à Cuba*. *Cahiers de géographie du Québec*, 33 (88) : 9-22.

Article (provenant d'un recueil de textes)

DESHAIES, Laurent (1989) *Le statut du Québec dans le contexte géopolitique actuel*. Dans Gilles Sénécal (éd.) *Territoires et minorités. De l'Amérique française au lac Meech*. Montréal, Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (Coll. « Les Cahiers scientifiques », n° 65).

Les références bibliographiques sont formulées dans la langue du manuscrit soumis, sauf pour les éléments suivants qui ne doivent pas être traduits: auteur, titre, maison d'édition.

Exemple pour un manuscrit en français:

SMITH, Joseph et MARTIN, Robert, dir. (1991) *Easy Geography*. Londres, Blake and Witt.

Exemple pour un manuscrit en anglais:

SMITH, Joseph and MARTIN, Robert, eds (1991) *Easy Geography*. London, Blake and Witt.

2.3 Tableaux

Les tableaux jugés indispensables au propos de l'auteur doivent être identifiés et numérotés en chiffres arabes et présentés clairement avec un titre précis et concis. Les renvois dans le texte se font entre parenthèses à la fin de la phrase (tableau 1). On évitera de placer dans le texte un tableau rassemblant les données ayant servi à confectionner un graphique ou une carte.

2.4 Illustrations

Les figures regroupent l'ensemble des documents qui servent à l'illustration, à l'exception des photographies : cartes, graphiques, schémas, images satellitaires, etc. Les figures doivent être identifiées et numérotées en chiffres arabes, selon l'ordre d'apparition. Les références aux figures dans le texte sont placées entre parenthèses à la fin de la phrase (figure 1). L'auteur prendra soin de leur donner un titre précis et concis et d'indiquer la source des données ou de la figure. Les figures doivent être complètes et prêtes pour la reproduction. Les brouillons ne sont pas acceptés. Il est important de joindre les données ayant servi à réaliser les figures et toute autre information susceptible de faciliter l'édition graphique.

En plus des originaux, il est demandé de transmettre une copie des fichiers informatiques ayant servi à construire les illustrations en précisant le logiciel utilisé. Il est recommandé de transmettre deux versions des fichiers informatiques ayant servi à construire les figures : une dans le format propre au logiciel (préciser la version) qui a servi à construire le fichier (ex. : Excel, MapInfo, Arcview, Freehand, Illustrator, etc.), et une en format EPS. Pour les graphiques, préparés de préférence dans Excel, on transmet la feuille de travail contenant les graphiques et la base de données ayant servi à les construire.

Pour faciliter leur reproduction, les photographies sont soumises sous la forme d'épreuves de bonne qualité. L'auteur joindra, sur une feuille à part, la légende accompagnant chaque photographie qu'il numérotera en chiffres arabes. Ici aussi, les références à ces documents sont placées entre parenthèses à la fin de la phrase (photo 1).

D'une manière générale, les Cahiers publient des illustrations en noir et blanc. Toutefois, l'auteur qui le désire peut demander un tirage en couleurs en autant qu'il s'engage au préalable à assumer les coûts supplémentaires.

3. QUELQUES RÈGLES TYPOGRAPHIQUES

Nous abordons ici des situations rencontrées couramment dans la préparation des manuscrits. Pour plus de détails, le lecteur consultera les ouvrages spécialisés cités à la fin de ce guide. Les quelques règles typographiques présentées ci-dessous sont tirées de Ramat (1984) et Guilloton et Cajolet-Laganière (1996).

3.1 Signes de ponctuation et espacements

On suit ici les recommandations de Guilloton et Cajolet-Laganière (1996) :

On ne place pas d'espace fine avant les signes de ponctuation (point, virgule, point-virgule, point d'exclamation, point d'interrogation, trait d'union, barre oblique), sauf

pour le deux-points, le tiret long, la parenthèse ouvrante, le crochet ouvrant et le guillemet ouvrant.

On laisse un espacement après les signes de ponctuation, à l'exception du trait-d'union, de la barre oblique, de la parenthèse, du crochet ouvrants et de l'apostrophe.

Exemple de traitement des espacements :

Ainsi, un quartier entier — celui de Beaufort — a été déclaré victime des « séquelles de l'industrialisation » après une enquête qui a coûté 125 000 \$; cela lui a valu d'être démoli! Mais faut-il condamner pour autant les urbanistes? Dans les années soixante-dix, on se souciait peu des choses du passé... ou de l'avenir (on consultera avec profit l'ouvrage suivant : Rapport annuel du comité de l'urbanisme [version préliminaire], 2e tome, 1996/1997). Il est bien entendu que le « staff » des services d'urbanisme n'y est pour rien!

3.2 Les nombres

Principes

- Les nombres de un à neuf inclus s'écrivent en lettres.
- Les nombres à partir de 10 s'écrivent en chiffres.
- Les nombres des deux catégories s'écrivent tous en chiffres lorsqu'ils se trouvent dans une même phrase.

Règles

Espacement et virgule

Espace fine séparant les groupes de trois chiffres (12 345), sauf pour les nombres inférieurs à 10 000 (3625).

Virgule pour les décimales (1,2).

Pas d'espace pour l'année (1990).

Mesures

Les mesures utilisent le système métrique. On place l'abréviation (sans le point) après la quantité, avec un espace entre les deux (123 km; 4,5 m; 6 cm; 7 mm).

Échelles

Les échelles numériques s'écrivent avec le signe : et sans la lettre e supérieure (1 : 25 000).

Important: on évitera de mentionner dans le texte l'échelle numérique d'une carte

accompagnant un manuscrit car cette proportion peut changer lors de la reproduction photographique du document.

Pourcentages

Les nombres exprimant des pourcentages s'écrivent toujours en chiffres et utilisent le symbole % séparé par une espace fine (12 %; 4,5 %). Cette règle s'applique également au pour mille (‰).

Chiffres romains

Les chiffres romains servent à qualifier les chapitres, les manifestations périodiques et les siècles (le chapitre III; le XI^e Congrès des géographes, le XX^e siècle).

3.3 Les abréviations

Principes

D'une manière générale, on ne fait pas une faute si on écrit les mots au long. On réserve le plus possible les abréviations pour les unités du système international.

Les abréviations courantes

Adjectifs numériques

premier (1^{er}); première (1^{ère}); deuxième (2^e)

Points cardinaux

nord (N.); sud (S.); est (E.); ouest (O.)

Numéros

Si le mot numéro est immédiatement précédé du nom qu'il qualifie et suivi d'un nombre écrit en chiffres, il s'abrège en n^o au singulier et nos au pluriel, sans points abrégatifs.

Sigles

La pratique qui s'impose actuellement veut que les sigles s'écrivent en capitales sans points abrégatifs (ONU; MRC; MLCP). À sa première mention dans un texte, on placera le sigle entre parenthèses après sa signification au long. Par la suite, on pourra n'utiliser que le sigle.

Et cætera

L'abréviation etc. n'est jamais suivie de points de suspension.

Idem, ibidem, et alii

Ces expressions latines utilisées dans les appels de références bibliographiques seront composées en italique et s'abrègent respectivement en *id.*, *ibid.* et *al.*

3.4 Les toponymes

Ce sont les noms de lieux ou noms géographiques. Les toponymes administratifs et les toponymes naturels constituent les deux classes principales. Les premiers désignent des espaces dont les limites sont fixées par l'homme, alors que les seconds désignent des lieux façonnés par la nature. Le toponyme est composé d'un générique et d'un spécifique. Le générique est un nom commun qui désigne le type d'entité géographique (rue, comté, lac, mont). Le spécifique sert à préciser la dénomination.

Écriture

Les génériques de tous les toponymes sont en bas de casse (minuscules) et les spécifiques s'écrivent toujours avec une capitale initiale (la rue Principale, le comté de Portneuf, le lac Clair, le mont Raoul-Blanchard). Quand un adjectif fait partie du spécifique, il prend une capitale initiale (le Petit lac Clair). Les composants du spécifique s'écrivent avec la capitale initiale (sauf les articles, prépositions, pronoms). L'article défini (le, la, les) prend la capitale quand il fait partie du spécifique. Il est recommandé d'écrire les toponymes au long.

Trait d'union

Seuls les spécifiques administratifs prennent un trait d'union (la ville de Deux-Montagnes, le lac des Deux Montagnes), sauf les toponymes anglais (New York). Les éléments d'un spécifique naturel sont liés par un trait d'union lorsqu'ils forment une expression consacrée (le ruisseau Vire-Crêpe) et lorsqu'ils forment un nom propre (le mont Raoul-Blanchard, le lac du Général-Tremblay).

En cas de doute concernant l'écriture d'un toponyme, consulter le Répertoire toponymique du Québec (Québec, 1987).

Une base de données sur les noms géographiques au Canada peut être consultée sur internet : <http://GeoNames.NRCan.gc.ca/francais/schoolnet/cgndb.html>

Pour les noms géographiques du territoire du Québec, consulter le site de la Commission de toponymie du Québec et la banque de données TOPOS sur le web : <http://www.toponymie.gouv.qc.ca/>

Pour les noms géographiques des autres pays, consulter un atlas récent en français.

3.5 Capitale ou bas de casse?

Disons d'emblée qu'il n'existe pas de règle absolue pour l'emploi des capitales car cet emploi dépend des circonstances. On observera toutefois certains principes. En cas d'incertitude, il est préférable d'utiliser le bas de casse. On veillera à toujours placer les accents sur les majuscules (dans le texte et sur les figures).

Principes d'utilisation des capitales

- Bas de casse au générique s'il est suivi d'un nom propre, capitale s'il est suivi d'un nom commun (le musée du Québec, l'Académie des sciences).
- Bas de casse au générique s'il est suivi d'un spécifique (le ministère des Finances, le lac Vert).
- Capitale à l'adjectif s'il est placé avant le spécifique, bas de casse s'il est après (la Belle Époque, les Temps modernes).
- La raison sociale élimine toutes les règles (l'Université Laval, la Banque Royale du Canada, la Confédération des syndicats nationaux).

Points cardinaux

Ils prennent la capitale lorsqu'ils désignent une région ou une étendue de territoire (les relations entre le Nord et le Sud, le Nord du Québec).

En bas de casse lorsqu'ils servent seulement à l'orientation (les relations du nord au sud, une ville située au sud-est de Québec).

Peuples et habitants

On met la capitale aux noms de races, de peuples et d'habitants (les Blancs, les Américains, les Montréalais).

Les adjectifs de peuples, d'habitants, de races et de langues prennent le bas de casse et le trait d'union au besoin (la littérature canadienne-française, la politique allemande, il parle français).

4. SOURCES UTILES

Guides généraux

PATARD, Benoît (1990) Directives aux auteurs pour la confection d'un manuscrit. Longueuil, Le Préambule, 168 p.

_____ (1995) Dictionnaire actuel de l'art d'écrire. Montréal, Fides, 611 p.

Pour les règles typographiques

FÉDÉRATION C.G.C. DE LA COMMUNICATION (1986) Code typographique. Choix de règles à l'usage des auteurs et professionnels du livre. Paris, Fédération C.G.C. de la communication, 15^e édition, 121 p.

GUILLOTON, N. et CAJOLET-LAGANIÈRE, H. (1996) Le français au bureau. Guide de l'Office de la langue française. Québec, Les publications du Québec, 4e édition, 404 pages.

RAMAT, A. (1999) Le Ramat de la typographie. Montréal, Aurel Ramat, éditeur, 191 p.

Pour la toponymie

FRANCE, Commission de toponymie (1986) Pays et capitales du monde. Paris, Institut géographique national.

QUÉBEC, Commission de toponymie (1987) Répertoire toponymique du Québec, 1987. Québec, Les publications du Québec, 1900 p. (et les suppléments cumulatifs).

_____ (1990) Guide toponymique du Québec. Québec, Les publications du Québec, 192 p.

Site internet de la Commission de toponymie du Québec :
<http://www.toponymie.gouv.qc.ca/>

Pour les noms propres

REY, Alain, dir. (1999) Le Petit Robert des noms propres. Paris, Le Robert, 2259 p.

ANNEXE B

Liste des photographies aériennes ainsi que les fichiers vectoriels

Année	Échelle	Identification
1928	1/31 628	Mosaïque 1
		Mosaïque 2
		Mosaïque 3
1964	1/15 840	Q64530 (13-18)
		Q64531 (152 -158)
		Q64538 (27-31;33)
1979	1/20 000	Q79839 (51-56)
		Q79870 (99 -105)
		Q79876 (72-76)
1998	1/40 000	98805086
		98805088
		98804018
2005	1/40 000	05800185
		05800187
		05801114

Années	Échelle	Identification
1989	1/50 000	31102
2004	1/20 000	31102-200-0101