

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**Étude du potentiel de l'imagerie historique Landsat
pour la délimitation des cotes des crues de référence :
cas de la rivière Petite Nation**

Par
Talha Sleimi

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe	Mélanie Trudel Faculté de génie Université de Sherbrooke
Examineur interne	Monique Bernier INRS-ETE
Directeur de recherche	Karem Chokmani INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Anas El Alem INRS-ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Karem Chokmani pour sa confiance, ses conseils, son support moral et financier et sa disponibilité durant la période de ce projet. Également, je remercie mon codirecteur Anas El Alem pour son enthousiasme, sa patience et sa générosité de partage et de son expertise en télédétection. Merci à l'équipe TENOR du Centre Eau-Terre-Environnement de l'INRS, pour leur encouragement et aide, notamment Charles Gignac, Sébastien Raymond, Dominic Thériault et Khalid Oubennaceur.

Je tiens à remercier le Ministère de l'Enseignement Supérieur Tunisien, de la Recherche Scientifique, pour la bourse d'excellence qui m'a été accordée durant mes deux années de maîtrise.

Enfin, une pensée particulière s'adresse à mon père, ma mère, mes frères et ma sœur, pour leur support moral.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'aménagement du territoire et de gestion du risque d'inondations, la délimitation des cotes de crues a un intérêt primordial pour différents organismes (gouvernementaux et municipaux), bureaux d'études ainsi que les compagnies d'assurances. En effet, plusieurs modèles physiques basés sur des données hydrauliques et météorologiques sont disponibles, mais ils sont limités dans le temps et dans l'espace. De plus, la collecte de données fiables de différents formats nécessite beaucoup de temps ainsi que des ressources humaines et financières importantes. À cela, s'ajoutent les incertitudes de la modélisation qui sont liées aux lectures, aux manipulations humaines et aux défaillances d'appareils de mesure (limnigraphes par exemple). La télédétection s'avère un outil intéressant qui peut apporter des solutions à la fois aux limitations spatio-temporelles qu'à la diversité des sources d'incertitudes des modèles physiques. Ainsi, l'objectif de cette étude est de tester le potentiel de l'imagerie satellitaire pour la cartographie du risque d'inondations à 1 mètre de résolution spatiale. L'approche est fondée uniquement sur les données LiDAR et de la série des capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI). Pour ce faire, il a été question de produire des cartes d'occurrence (2, 20, et 100 ans) de l'étendu maximal de l'eau pour une région d'intérêt : la rivière Petit Nation. Ces cartes sont les résultats d'une analyse fréquentielle appliquée sur des composites annuelles du NDWI (*Normalized Difference Water Index*) entre l'année 1982 et 2016. À partir des données LiDAR, il a été par la suite possible de désagréger les cartes d'occurrence de 30 à 1 mètre de résolution spatiale. Cette approche promet plusieurs avantages et atouts aux décideurs en termes de gestion du risque d'inondations et de prévention de la santé publique, et ce, par : 1) la simplicité d'implémentation à temps et à coûts réduits et 2) la possibilité d'application à grande échelle, notamment dans les régions à faible budget municipal où les stations de mesures hydrométriques et météorologiques sont peu ou pas disponibles. Un succès global de 63 % et un indice *Kappa* de 30 % sont les résultats de la validation par matrice de confusion de l'approche proposée. Cependant, il est à souligner que la délimitation des cotes de crues des récurrences de 2 et 20 ans, dont les organismes gouvernementaux et municipaux s'intéressent le plus, étaient plus précises (succès global supérieur à 65 %) que celles de la récurrence de 100 ans (succès global inférieur à 50 %). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la performance relativement faible de l'approche développée, dont le nombre d'images Landsat et la précision des données de validation utilisées. Par la présente étude, le potentiel des images satellites à détecter et à délimiter les cotes de crues a été démontré. Les résultats peuvent ainsi servir comme point de départ pour d'autres études futures afin de mieux raffiner la modélisation des cotes de crues par imagerie satellite.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	11
1.1	MISE EN CONTEXTE	11
1.2	PROBLÉMATIQUE	13
1.3	OBJECTIF GÉNÉRAL	14
1.4	HYPOTHÈSES	15
1.5	STRUCTURE DU MÉMOIRE	15
2	REVUE DE LITTÉRATURE.....	16
2.1	CRUES ET INONDATIONS	16
2.2	PROGRAMMES DE DÉLIMITATION DES CRUES ET LOI	17
2.3	DÉLIMITATION DES COTES DES CRUES : MÉTHODES CONVENTIONNELLES	19
2.3.1	<i>Les méthodes hydrologiques et hydrauliques.....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Les méthodes biophysiques.....</i>	<i>20</i>
2.3.3	<i>Méthodes géomorphologiques et hydrogéomorphologiques</i>	<i>23</i>
2.3.4	<i>La méthode historique.....</i>	<i>24</i>
2.3.5	<i>La méthode pédologique.....</i>	<i>24</i>
2.3.6	<i>La méthode combinée.....</i>	<i>24</i>
2.4	DÉLIMITATION DES COTES DES CRUES : TÉLÉDÉTECTION	25
2.4.1	<i>Comportement de l'eau par télédétection et indices de détection de l'eau</i>	<i>25</i>
2.4.2	<i>La télédétection des zones inondées.....</i>	<i>26</i>
2.5	MÉTHODES STATISTIQUES.....	31
2.5.1	<i>Classification des images satellitaires.....</i>	<i>31</i>
2.5.2	<i>Analyse fréquentielle.....</i>	<i>32</i>
3	MÉTHODE ET MATÉRIELS.....	34
3.1	ZONE D'ÉTUDE	34
3.2	PRÉSENTATION DES DONNÉES.....	37
3.2.1	<i>Les capteurs Landsat.....</i>	<i>37</i>
3.2.2	<i>Données d'élévation.....</i>	<i>40</i>
3.2.3	<i>Données de validation.....</i>	<i>41</i>
3.3	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	42

3.3.1	<i>Concept méthodologie</i>	42
3.3.2	<i>Prétraitement des images satellitaires</i>	43
3.3.3	<i>Traitement des images historiques Landsat TM/ETM+ et OLI</i>	44
3.3.4	<i>Étendue maximale annuelle de l'eau</i>	45
3.3.5	<i>Classification Fuzzy-c means</i>	47
3.3.6	<i>Analyse fréquentielle</i>	48
3.3.7	<i>Désagrégation</i>	51
4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	54
4.1	CARTES COMPOSITES DU NDWI ANNUELLES.....	54
4.2	CARTES DE PROBABILITÉ D'APPARTENANCE À LA CLASSE EAU	56
4.3	CARTES DE PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DE L'EAU	57
4.4	DÉSAGRÉGATION SPATIALE ET PRODUCTION DES CARTES DES COTES DE CRUES.....	59
5	CONCLUSIONS	66
	BIBLIOGRAPHIE	69

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1 : CARACTÉRISTIQUES SPATIALES ET SPECTRALES DES CAPTEURS LANDSAT 4-5 (USGS, 2018B) .	37
TABLEAU 3.2 : CARACTÉRISTIQUES SPATIALES ET SPECTRALES DU CAPTEUR LANDSAT 7-ETM+ (USGS, 2018B)	38
TABLEAU 3.3 : CARACTÉRISTIQUES SPATIALES ET SPECTRALES DU CAPTEUR LANDSAT 8-OLI/TIRS(BARSI ET AL., 2014)	38
TABLEAU 3.4 : COMPARAISON ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DE CHAQUE SATELLITE (USGS, 2018B).....	39
TABLEAU 3.5 : CARACTÉRISTIQUES GÉOGRAPHIQUES DES IMAGES LANDSAT UTILISÉES POUR DÉLIMITER LES CÔTES DE CRUES	40
TABLEAU 4.1 : LA MATRICE DE CONFUSION DE LA DÉLIMITATION DES COTES DE CRUES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE PAR RAPPORT AUX COTES DE CRUES DE RÉFÉRENCE	60
TABLEAU 4.2 : DATE D'ACQUISITION DES IMAGES LANDSAT ET DATES DE PRÉLÈVEMENT DES MESURES DES DÉBITS MAXIMUMS ANNUELS DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES (AVEC LE NUMÉRO FÉDÉRAL DE LA 02LD005)	62
TABLEAU 4.3 : LA MATRICE DE CONFUSION DE LA DÉLIMITATION DES COTES DE CRUES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE PAR RAPPORT AUX COTES DE CRUES DE RÉFÉRENCE	64

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 : MÉTHODE BOTANIQUE EXPERTE, VUE EN PLAN (A), VUE EN COUPE (B) AVEC L'IDENTIFICATION DE LA LIGNE DES HAUTES EAUX (LHE)(MDELCC, 2015).....	22
FIGURE 2.2 : RÉFLECTANCE DE L'EAU, VÉGÉTATION, SOL ET LES CANAUX DE LANDSAT TM (EUROPEAN SPACE AGENCY).....	26
FIGURE 2.3 : LES ÉTAPES PRINCIPALES DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE (MEYLAN, FAVRE AND MUSY, 2008B)	32
FIGURE 3.1 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE DANS LA RIVIÈRE PETITE NATION SITUÉE ENTRE MONTRÉAL ET OTTAWA.....	35
FIGURE 3.2 : INONDATION DE LA PETITE NATION EN 1972.....	36
FIGURE 3.3 : INONDATION DE LA PETITE NATION EN 2017 (ICI RADIO-CANADA)	36
FIGURE 3.4 : POSITION GÉOGRAPHIQUE DE LA TUILE 1 ET TUILE 2 PAR RAPPORT À LA ZONE D'ÉTUDE	39
FIGURE 3.5 : PRÉSENTATION DES COTES DE CRUES DE RÉFÉRENCE DÉLIMITÉES PAR LE GOUVERNEMENT DU QUÉBEC	41
FIGURE 3.6 ORGANIGRAMME MÉTHODOLOGIQUE DE LA DÉLIMITATION DES COTE DE CRUES.....	43
FIGURE 3.7 : EXEMPLE DE LA CARTE COMPOSITE ANNUELLE	45
FIGURE 3.8 : EFFETS DES NUAGES ET LEURS OMBRES : A) DANS LA BANDE PROCHE INFRAROUGE ET B) VIA LE NDWI (B) DE L'IMAGE LANDSAT-5 PRIS LE 29 D'AOÛT 2011	46
FIGURE 3.9 : EXEMPLE DE LA CLASSIFICATION D'UN PIXEL PAR RAPPORT AUX DEUX CLASSES : TERRE ET EAU.....	48
FIGURE 3.10 : LA FONCTION DE DENSITÉ (A) ET DE RÉPARTITION CUMULÉE (B) DE LA FONCTION BÊTA	50
FIGURE 3.11 : ÉTAPES DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE : ÉTAPE 1) ANALYSE FRÉQUENTIELLE POUR CALCULER LES PARAMÈTRES A ET B À PARTIR DES CARTES MAXIMUM D'EAU. ÉTAPE 2) EXTRAIRE LA PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DE L'EAU DE CHAQUE PIXEL À PARTIR DES PARAMÈTRES A ET B.	50
FIGURE 3.12 : ÉTAPE DE DÉSAGRÉGATION DES CARTES DE PROBABILITÉ D'APARTENANCE DE LA CLASSE D'EAU AVEC LES DONNÉES D'ÉLÉVATION HAND	51
FIGURE 3.13 : LES ALTITUDES MNT DE LA ZONE D'ÉTUDE (A) ET LES ALTITUDES HAND DE LA ZONE D'ÉTUDE (B)	52
FIGURE 4.1 : NOMBRE D'IMAGES POUR ÉLABORER LES IMAGES COMPOSITES ANNUELLES	54
FIGURE 4.2 : CARTES COMPOSITES DES ANNÉES : A) 1985 ET B) 1991, AVEC LEUR ZOOM SUR LA RÉGION DE LA PETIT NATION (CADRE ROUGE).....	55
FIGURE 4.3 : CARTES DE PROBABILITÉ D'APARTENANCE À LA CLASSE D'EAU EN 1985 (A) ET 1991 (B), ÉLABORÉES PAR UNE CLASSIFICATION FUZZY-C MEANS.....	56
FIGURE 4.4 : CARTES DE PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DE L'EAU ESTIMÉES POUR LES PÉRIODES DE RETOUR DE : A) 2, B) 20 ET C) 100 ANS	58

FIGURE 4.5 : LES CARTES DES COTES DE CRUES ÉLABORÉES PAR : A) LA PRÉSENTE MÉTHODE PROPOSÉE ET B) LE GOUVERNEMENT DU QUÉBEC À PARTIR DE LA MÉTHODE HYDRAULIQUE 59

FIGURE 4.6 : LES CARTES DES COTES DE CRUES ÉLABORÉES PAR : A) LE GOUVERNEMENT DU QUÉBEC À PARTIR DE LA MÉTHODE HYDRAULIQUE B) LA PRÉSENTE MÉTHODE PROPOSÉE AVANT LA DÉSAGRÉGATION..... 63

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les changements climatiques influencent le cycle de l'eau, ce qui accroît l'intensité des inondations et des phénomènes climatiques périodiques. En effet, la température du globe terrestre est en hausse, ce qui induit une augmentation dans la fréquence de variabilité du climat. Par conséquent, la prévision des inondations et l'estimation des récurrences sont devenues plus complexes (Luke and Kersel 2008).

Des statistiques ont mis en évidence que le nombre de décès liés aux inondations ainsi que les pertes économiques au niveau mondial ont augmenté durant les derniers 50 ans. D'après le United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2002), 58 millions de personnes sont touchées par les catastrophes naturelles entre 1981 à 2000, dont les deux tiers sont causés par les inondations. En Afrique de l'Ouest, 600 000 personnes de 16 pays différents ont été affectées par des inondations en septembre 2009 (Baldassarre et al. 2010). Les inondations ne se limitent pas seulement aux pays sous-développés ou en voie de développement, mais également aux pays développés tels les États-Unis où le nombre de mortalités liées à ce phénomène a augmenté durant les 25 dernières années (Kunkel, Pielke, and Changnon 1999). Au Canada, l'inondation est considérée comme la catastrophe naturelle la plus dangereuse (augmentation d'environ 70 % après 1959 (Laforce et al. 2011)).

Au Québec, depuis l'année 1990, le gouvernement a identifié 27 catastrophes liées aux inondations. Parmi les plus récentes, l'inondation de la rivière Richelieu en 2011, qui a touché 40 municipalités, dont 11 en état d'urgence. Également, 2500 résidences, des routes, des ponts et des terres agricoles ont été endommagés. De même, en 2017, les inondations ont marqué les citoyens du Québec par leurs étendues et leurs conséquences. Plus précisément, 261 municipalités ont été touchées. Les inondations ont recouvertes plusieurs régions le long du Saint-Laurent comme l'Outaouais, la Gaspésie et la région de Montréal. Les coûts des dommages étaient estimés à plusieurs centaines de millions de dollars canadiens. Des écarts importants entre les cotes de crues réelles et les cotes de crues théoriques ont été constatés, entre autres les récurrences de 20 ans et de 100 ans (Ministère de la Sécurité publique 2018).

Malgré que les inondations causent beaucoup de pertes, elles sont des sources d'eau importantes pour la survie à de nombreuses plantes riveraines dans les zones arides et semi-arides. De même, elles jouent un rôle crucial dans l'équilibre de l'écosystème et la vie de la faune et la flore. Par conséquent, la cartographie des inondations à l'échelle temporelle et spatiale est utile pour le suivi des écosystèmes (Huang, Chen, and Wu 2013). Ainsi, les cotes de crues sont demandées par les organisations de secours humanitaires d'envergure mondiale. Les gouvernements tentent, de leurs parts, de délimiter les plaines inondables et considèrent que la prévention est un élément clé dans leurs politiques pour garantir un meilleur aménagement du territoire touché par les inondations. Par exemple, les cotes des crues aident les gouvernements à prendre la décision par rapport au support financier des nouvelles entreprises selon leur niveau d'exposition au risque d'inondation (Burrell et al. 2015).

1.2 Problématique

Les méthodes conventionnelles de la cartographie des inondations sont basées sur deux notions principales, la récurrence et son étendue :

1. *La récurrence* est calculée statistiquement sur l'historique des mesures de débits, ainsi que l'historique de précipitations, qui proviennent des stations de mesure. Dans le cas d'indisponibilité de données, la récurrence peut être définie par un transfert de comportement des bassins versants jaugés à d'autres non jaugés. On peut utiliser aussi d'autres approches pour propager les mesures de précipitations observées vers les zones non jaugées. En outre, des enquêtes sur terrain sont nécessaires pour calibrer des modèles hydrologiques.
2. *L'étendue des inondations* est étudiée par des modèles hydrauliques, qui se basent sur la topographie des cours d'eau. En cas d'indisponibilité, l'étendue des crues est déterminée par la méthode hydropédologique qui se base sur les données des cartes topographiques et des cartes pédologiques numérisées (Smith, Sampson, and Bates 2015).

Le regroupement de plusieurs types de données fiables prend beaucoup de temps et nécessite des ressources humaines et financières importantes. De plus, il existe plusieurs sources d'incertitudes qui sont liées à : l'observation, aux manipulations humaines, aux modèles hydrauliques et hydrologiques, ainsi qu'aux défaillances d'appareils de mesure (limnigraphes par exemple). Des restrictions budgétaires obligent par moment la fermeture des stations de mesures, le gouvernement fédéral canadien ayant procédé à la fermeture de 724 stations hydrométriques (considérées d'une valeur limitée ou redondantes) entre l'année 1990 et l'année 1998 (Shrubsole et al. 2003). Ces éléments rendent par conséquent la délimitation des cotes de crues via les méthodes conventionnelles une tâche fastidieuse, coûteuse et limitée dans le temps et l'espace.

Une approche de cartographie des zones inondables fondées uniquement sur les données satellitaires serait d'une importance considérable pour la communauté scientifique ainsi que les différents organismes de gestion du risque d'inondation, particulièrement dans les régions où les stations hydrométriques sont peu ou pas disponibles. Cette approche pourrait offrir plusieurs avantages, notamment le potentiel d'application à grande échelle, ne nécessitant que des ressources humaines et financières réduites (Giustarini et al. 2015). Cependant, les approches basées sur la télédétection sont actuellement peu exploitées, puisqu'elles-mêmes dépendent des

données collectées sur le terrain ou bien des modèles hydrauliques comme proposés par Huang, Chen and Wu (2013) et Thomas *et al.* (2015). En plus, la résolution spatiale des satellites (offrant des données gratuites) est un facteur limitant ne permettant qu'une cartographie grossière des zones inondées (produits proposés par Google Engine (Gorelick et al. 2017)). Pour ces raisons, la délimitation des cotes de crues basée sur les données satellitaires reste une piste à explorer, particulièrement à une échelle provinciale où plusieurs petits cours d'eau et bassins versants sont encore peu étudiés (Messier, Anctil, and Beaulieu 2007).

1.3 Objectif général

L'objectif général de ce projet est de tester le potentiel des images historiques (de 1982 à 2016) de la série des capteurs Landsat, à délimiter les zones inondables pour différentes récurrences (2, 20 et 100 ans) à 1 mètre de résolution spatiale. L'objectif général a été scindé en trois objectifs spécifiques :

1. Déterminer l'étendu maximal annuel des zones inondées, entre les années 1982 à 2016, à partir d'images composites annuelles de l'indice normalisé de l'eau (NDWI (*Normalized Difference Water Index*)).
2. Estimer la probabilité d'appartenance à la classe "eau" pour chaque pixel des cartes composites annuelles via une classification automatique.
3. Estimer la probabilité des récurrences 2, 20 et 100 ans des zones inondées, à 30 mètres de résolution spatiale, via une analyse fréquentielle appliquée aux images composites annuelles classifiées.
4. Désagréger la résolution spatiale de 30 à 1 mètres en se basant sur les données LiDAR.

1.4 Hypothèses

Trois hypothèses ont été la raison d'être de ce projet :

1. À partir des images composites annuelles du NDWI, il est possible d'estimer l'étendue maximale des cours d'eau.
2. Via une analyse fréquentielle, il est possible d'estimer la probabilité d'occurrence des zones inondées, et ce, pour différentes récurrences (2, 20 et 100 ans).
3. En se basant sur les données topographiques du LiDAR, il est possible de désagréger les limites des cotes de crues à la résolution spatiale des données LiDAR (1 mètre).

1.5 Structure du mémoire

Ce document s'articule sur trois grandes parties suivant l'introduction. Le chapitre 2 où une synthèse des travaux antérieurs reliés à la présente étude est présentée. Dans le chapitre 3, une explication de la méthodologie adoptée est détaillée. Les résultats et une discussion sont présentés au chapitre 4. Finalement les conclusions sont présentés au chapitre 5.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Crues et inondations

Une inondation est l'action d'une "*submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal*" (Observatoire Régional de l'Environnement Poitou-Charentes 2016). Comme la crue correspond à la montée des eaux d'un cours d'eau, l'inondation est le phénomène qui en résulte (World Meteorological Organization and United Nations Educational Scientific Cultural Organization 2012).

D'un point de vue spatial, les crues sont classées en trois catégories : crues éclair, inondations fluviales et inondations côtières (Jonkman and Kelman 2005). Les crues peuvent être classées en trois classes selon leurs risques (l'importance du phénomène et son impact sur l'infrastructure) : la première classe concerne les crues pour lesquelles le cours d'eau est touché partiellement ou totalement, ainsi il a peu ou pas d'impact sur les structures de génie civil. La seconde touche une partie où la plupart du cours d'eau et une grande partie des berges sont submergés, donc les infrastructures comme les ponts et les réseaux de transport sont fortement touchées ainsi que l'apport solide est assez important. Dans cette classe, l'impact sur les différentes constructions est très grave. La troisième classe comprend les événements exceptionnels sur une échelle nationale où les infrastructures sont entièrement détruites et où des ponts peuvent être emportés, par exemple (Cœur, Lang, and Paquier 2002).

D'un point de vue temporel, les crues sont caractérisées par les lignes des cotes de crues qui délimitent les inondations à chaque période de retour. Selon le World Meteorological Organization and United Nations Educational Scientific Cultural Organization (2012), une période de retour est synonyme aux "*périodes de récurrence moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années qui sépare un événement d'une grandeur donnée, d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure*".

La délimitation des cotes de crues a un intérêt primordial pour différents organismes (gouvernementaux et municipaux), bureaux d'études ainsi que les agences d'assurances, puisqu'elles sont utilisées pour déterminer les mesures de protection des constructions et des activités autorisées à proximité des rives de la rivière. En effet, les réglementations de la ville de Québec définissent les zones inondables en deux types, selon la période de récurrence (ou de retour) : les zones de grande récurrence, caractérisées par une crue de 2 ans (0-2 ans) et, où la

construction est strictement interdite et nécessite des travaux de stabilisation de sol et d'implantation végétale. Les zones de récurrence de 20 ans (2-20 ans) pouvant être inondées dans une période de retour entre 2 et 20 ans, où les travaux sont autorisés avec une distance de sécurité minimale de la rive du cours d'eau (Municipalité de ville de Québec 2016).

2.2 Programmes de délimitation des crues et loi

Les programmes de gestion des inondations sont divisés en trois étapes : La première est la planification qui comprend la délimitation des cotes de crues et l'élaboration des cartes de risques, la deuxième est la gestion des urgences où la prise de décisions qui se fait sur quatre niveaux : fédéral, provincial, local et personnel et la dernière étape est la réhabilitation (P. Simonović 1999).

- Programmes nationaux (à l'extérieur du Canada)

En 1969, Les États-Unis, ont lancé un programme fédéral appelé "*National Flood Insurance Program*" qui est le résultat d'une coopération entre les communautés locales et le gouvernement fédéral. Ce dernier visait à élaborer deux types de cartes : les cartes des limites des risques des inondations appelées "*Flood Hazard Boundary Maps*", utilisées en cas d'urgences, et les cartes d'assurance contre les inondations appelées "*Flood Insurance Rate Maps*", utilisées pour l'aménagement du territoire par le gouvernement. Depuis 2005, les municipalités japonaises ont lancé un programme pour la production et la distribution des cartes de délimitation des crues. Les cartes publiques (à l'échelle de 1:5 000 et 1:10 000) n'ont aucune indication sur les périodes de retour ou des inondations récentes. Par contre, elles sont très pratiques car elles indiquent les routes à ne pas utiliser en cas d'évacuation ainsi que l'emplacement des abris pour se protéger contre les inondations. De plus, chaque individu ou famille peut désigner sa propre route d'évacuation sur la carte (Alphen and Passchier 2007). En 2007, le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne ont également lancé un programme pour la gestion des risques d'inondation et la délimitation des cotes de crues appelé "*European Flood Directive 2007*" (European Parliament and Council of the European Union 2007). Les objectifs de ce programme visaient à produire des cartes de l'étendue et du niveau de l'inondation pour trois probabilités : élevée, moyenne et faible (Burrell et al. 2015).

- Programmes canadiens

En 1975, le Canada a été reconnu comme le pays le plus développé dans le domaine de la gestion des inondations, grâce au programme de réduction des dommages causés par les

inondations (*The Flood Damage Reduction Program (FDRP)*). Handmer and Parker (1992) ont suggéré l'*Emergency Preparedness Canada (EPC)* ou l'*Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness (OCIPEP)* comme modèles aux programmes gouvernementaux appropriés de gestion et d'aménagement d'urgence face aux risques pour la Grande-Bretagne. Le FDRP consiste à élaborer des cartes des crues publiques d'échelle 1:10 000 afin de réduire le nombre des victimes ainsi que des pertes économiques et d'anticiper des travaux de lutte contre les inondations. D'autres cartes ont été produites pour les planificateurs et les ingénieurs, d'une échelle de 1:2 000 (Loë 2000). Au bout de 10 ans de fonctionnement, le gouvernement fédéral a dû abandonner ce programme à cause de problèmes financiers et du faible engagement des provinces. Comme conséquence, il y a eu la fermeture de 724 stations hydrométriques ainsi que d'autres stations considérées d'une valeur limitée ou redondante (Shrubsole et al. 2003).

Après la fin du FDRP, chaque province a créé son propre programme pour délimiter les cotes de crue, par exemple la province de l'Ontario a proposé ; "*Ontario Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit – 2002*". Ce dernier est basé sur les niveaux d'eau causés par les tempêtes comme celles du *Hurricane Hazel storm* en 1954 ou Timmins en 1961 (Ontario Ministry of Natural Resources Water 2002). La province de l'Alberta a créé le programme d'*Alberta Flood Hazard Identification Program Guidelines – July 2011*, où la délimitation la plus récente a été faite en 2015 pour la ville de Whitecourt et dans les zones actives dans l'entourage de Woodlands County (Woodlands country and environment and sustainable resources 2015). L'association canadienne des barrages (CDA) a lancé aussi un programme nommé "*CDA Dam Safety Guidelines*", dont les cotes des crues ont été publiées en 1995, puis révisées dans les années 2007 et 2013 (Burrell et al. 2015). Au Québec, la loi d'aménagement et d'urbanisme du gouvernement du Québec a exigé que chaque Municipalité régionale de comté (MRC) ainsi que les municipalités locales délimitent les cotes de crues de leurs régions pour cartographier les zones inondables. Ainsi, le gouvernement du Québec a lancé deux programmes : le premier a été émis par le ministère de l'Environnement après la crue de juillet 1996, à la suite des recommandations de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, afin de réaliser les cotes de crues de récurrences sur 155 sites. Le deuxième programme a été créé en accord avec le gouvernement fédéral, entre l'année 1976 et 2001 et a permis de réaliser plus de 500 cartes des zones inondables sur une étendue de 245 municipalités. L'élaboration des cartes a pris fin en mars 2004 (Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2016).

Le programme national d'atténuation des catastrophes (PNAC) a été proposé postérieurement aux inondations en Saskatchewan, au Manitoba et au Québec en 2011. Ce programme permet de planifier une intervention efficace pour les inondations les plus fréquentes et les plus extrêmes. Un budget de 200 millions de dollars sur cinq ans (de 2015 à 2020) a été établi pour ce dernier. La décision est prise au niveau fédéral et/ou provincial et/ou municipal afin d'élaborer des cartes de risques d'inondations (Ministère de la Sécurité publique Canada 2015).

2.3 Délimitation des cotes des crues : Méthodes conventionnelles

Le choix entre les différentes approches conventionnelles d'estimation et de délimitation (ou délinéation) des cotes de crues dépend des données disponibles, de l'objectif du projet et des moyens financiers disponibles.

2.3.1 Les méthodes hydrologiques et hydrauliques

L'application de ces approches est basée sur deux étapes : étude *hydrologique* et étude *hydraulique*. **L'hydrologie** est la discipline qui permet de calculer les débits et la période de retour à partir des séries d'observations (précipitations ou débits de cours d'eau) et des courbes de tarages. **L'hydraulique**, quant-à-elle, est la science qui permet de calculer le niveau d'eau au long de la rivière à partir des caractéristiques d'écoulements et de la topographie du terrain.

Pour estimer les caractéristiques d'écoulements dans les zones non jaugées, deux familles d'approches sont adoptées : l'approche de la *régionalisation* et l'approche de la *propagation*. La **propagation** consiste à transférer le comportement des précipitations observées dans les régions couvertes par des stations météorologiques à d'autres régions non couvertes. La propagation des précipitations se fait à l'aide des modèles hydrologiques (Smith, Sampson, and Bates 2015). La **régionalisation** consiste à transférer le comportement d'écoulement des bassins versants jaugés à d'autres non jaugés (ou partiellement jaugés et calés). Deux étapes sont nécessaires pour procéder à ce transfert : 1) une classification des bassins versants selon l'homogénéité et 2) une estimation régionale des caractéristiques d'écoulements dans des régions non jaugées. La deuxième étape s'effectue à l'aide de plusieurs modèles d'estimation régionale comme : ROI (Lo et al. 2017)

L'étude hydraulique est basée sur des simulations des modèles hydrauliques. Plusieurs données sont indispensables comme : les données topographiques pour décrire la géométrie des rivières, des obstacles et des plaines inondables, des observations hydrométriques et des courbes

d'évaluation pour déterminer les conditions initiales ainsi que les hydrogrammes, ainsi que les marques des inondations les plus importantes et les cartes d'extension pour l'étalonnage et la validation (Di Baldassarre 2012). Par conséquent, la précision de la modélisation dépend principalement du nombre de paramètres inclus et la qualité des données d'entrées, ainsi que leur mise en œuvre.

Il existe plusieurs types de modèles hydraulique : unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D), qui varient en complexité selon la nature des variables d'entrées (Anees et al. 2016). Les experts déterminent le type de modèle à utiliser selon l'objectif, les enjeux du projet et les données disponibles. Les modèles 2D, plus complexes que les modèles 1D, nécessitent plus de données à haute résolution (inférieure à 10 mètres) pour construire un maillage fin. Cependant, ils sont plus précis et riches en termes d'informations (vitesse d'écoulement, hauteur d'eau, ... etc.) et donnent une visualisation plus globale (Arnaud et al. 2011). Les modèles combinés 1D et 2D augmentent la qualité des résultats et offre un gain de temps et d'espace dans les mémoires des ordinateurs tout en limitant les facteurs utilisés par le modèle 2D (Horritt 2006). Quant aux modèles 3D, ils sont appliqués pour les flux des canaux ouverts et ils ne sont pas adaptés pour estimer le niveau d'eau dans les plaines inondables (Anees et al. 2016).

Trois principales sources d'incertitude pour les modèles hydrauliques sont : 1) erreur dans l'observation incertaine des variables d'entrée comme la hauteur de la précipitation et la température ; 2) incertitude de la structure du modèle qui ne permet pas de schématiser correctement les processus naturels d'inondations et 3) étalonnage imparfait des modèles hydrauliques. Les sources d'incertitude sont épistémiques ou bien aléatoires. L'incertitude épistémique se réfère à l'état de connaissance d'un système physique et à notre capacité à mesurer et à modéliser l'inondation, tandis que l'incertitude aléatoire représente l'aléatoire et la variabilité (tant dans l'espace que dans le temps) observées dans la nature (Götzinger and Bárdossy 2008).

2.3.2 Les méthodes biophysiques

L'approche biophysique est basée sur la détection des indices physiques afin de vérifier l'apparition d'inondations passées. Cette approche peut être appliquée aux inondations de glace. Les preuves physiques des inondations de glace passées pourraient inclure des lignes de coupe de végétation et des cicatrices de glace créées par des mouvements de glace (Burrell et al. 2015). Il y a deux approches biophysiques : la méthode botanique experte et la méthode botanique simplifiée.

2.3.2.1 *Méthode botanique experte*

Cette méthode réalisée par un expert en botanique (Figure 2.1) consiste à identifier la ligne des hautes eaux pour l'apparition ou la disparition d'un ensemble d'espèces végétales à l'aide d'un document fourni par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Ce document contient plus de 600 espèces. La présence du couvert végétal et d'un nombre d'espèces bien défini (d'arbres, d'arbustes, de mousses aquatiques et de lichens) sont essentiels. Ainsi, l'application de cette méthode est limitée dans l'espace. Par exemple, on ne peut pas l'appliquer dans une zone urbaine, où il n'y a pas de couvert végétal, de même qu'on ne peut pas l'appliquer dans une autre région ayant d'autres types d'espèces végétales. De plus, la ligne des hautes eaux correspond au débit de récurrence de 2 ans, donc cette méthode ne permet pas la délimitation d'une crue de 20 ans par exemple (Messier 2007).

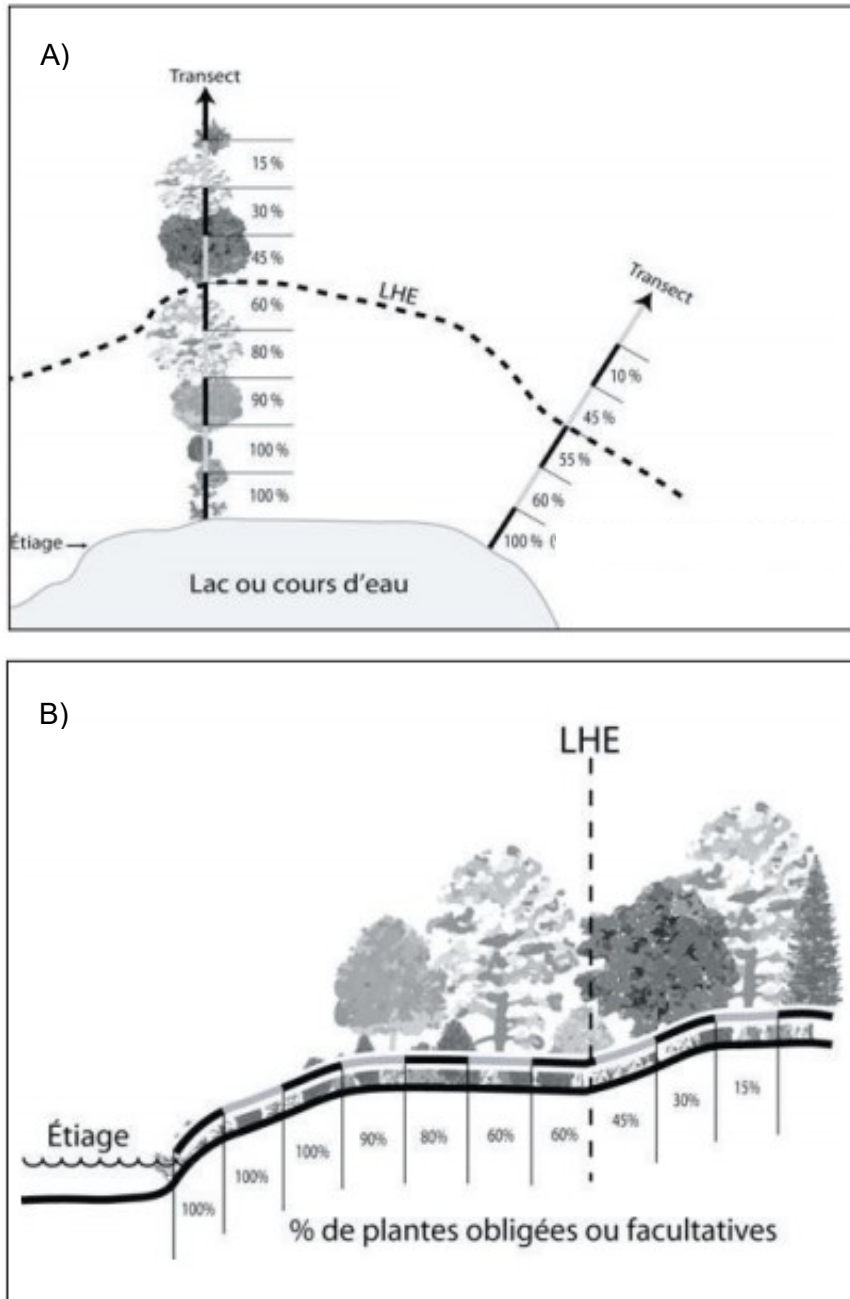


Figure 2.1 : Méthode botanique experte, vue en plan (A), vue en coupe (B) avec l'identification de la ligne des hautes eaux (LHE)(MDELCC, 2015).

2.3.2.2 La méthode botanique simplifiée

Cette méthode désigne la cote des hautes eaux à partir d'un nombre d'espèces végétales indicatrices plus restreint (26 espèces), elle dépend aussi d'autres indicateurs physiques comme les limites d'usure de sédimentation, des débris et de la litière du sous-bois. Contrairement à la méthode botanique experte, elle est mieux adaptée aux milieux artificiels et plus précise, car elle

dépend d'autres indicateurs physiques. Malgré l'effort du MDDELCC pour simplifier et pour vérifier les lignes des hautes eaux avec plusieurs indices, cette méthode est approximative, car elle est basée sur l'observation des experts, qui délimitent parfois plusieurs lignes dans la même zone. Les méthodes botaniques caractérisées par la complexité de localisation de la ligne des hautes eaux, nécessitent la présence d'un expert en botanique. Donc, cette approche ne peut pas couvrir une zone importante, il faut un nombre élevé de techniciens et un temps assez long pour avoir des résultats (Messier 2007).

2.3.3 Méthodes géomorphologiques et hydrogéomorphologiques

De nombreux chercheurs soulignent l'efficacité de l'analyse *géomorphologique* pour l'étude des inondations (Lastra et al. 2008). Cette méthodologie, connue en France, est devenue la principale pour élaborer les plans de prévention du risque d'inondation (PPRI) (Lelièvre, Buffin-Bélanger, and Morneau 2008). L'analyse géomorphologique est reconnue comme une partie essentielle à la compréhension des plaines d'inondation et à la connaissance rigoureuse du terrain, façonné par l'écoulement de l'eau et par le transport des sédiments fins et grossiers. La création d'une nouvelle forme géomorphologique modifie l'écoulement de l'eau, par conséquent, le débit de l'eau et le niveau de la rivière (Lastra et al. 2008). Cette méthodologie a montré des résultats positifs lors d'une application régionale sur le bassin Midi-Pyrénées en France, sur une échelle de 1/25 000 et sur une étendue de 7 000 km, puis sur une échelle de 1/5 000 grâce à l'utilisation de la photographie aérienne et des séries hydrauliques (Raclot 2003).

Récemment, des cartes des plaines inondables ont été élaborées à l'aide de l'approche géomorphologique en se basant sur des données historiques (méthode hydraulique) des inondations passées dans la région montagneuse du nord-ouest de l'Espagne (Lastra et al. 2008). Les résultats de cette étude ont démontré qu'il est difficile de prendre en compte les modifications du terrain dans les zones urbaines et d'identifier le lit moyen de la rivière sous la modification anthropique (Lelièvre, Buffin-Bélanger, and Morneau 2008). L'application de cette méthodologie dépend principalement de la connaissance précise de la morphologie du terrain, ce qui est difficile parfois à détecter en raison de la configuration morphologique du terrain (limites masquées par des phénomènes comme l'érosion). En conclusion, cette approche doit être consolidée par des données historiques pour être plus précise et efficace. De plus, il est nécessaire d'avoir des données LiDAR, ce qui n'est pas toujours le cas (Raclot 2003).

2.3.4 La méthode historique

La méthode historique, appelée aussi l'enveloppe des inondations, basée sur des observations historiques et des témoignages, représente bien les hauteurs d'eau réelles des inondations passées (Direction Départementale des Territoire et de la Mer 2012). Un des moyens les plus faciles et défendables pour délimiter un risque d'inondation est de cartographier l'étendue géographique d'un important événement d'inondation passé. L'approche de la cartographie d'un événement passé présente l'avantage d'être facilement comprise et défendable, car l'événement s'est déjà produit. De plus, cette méthodologie peut être appliquée aux inondations de glace, comme celles produites dans la région de Perth-Andover en 1976 et 1987 (Burrell et al. 2015). L'enveloppe des inondations permet de fournir des données de haute précision sur les crues passées déduites des mesures et des témoignages, mieux que celles qui sont produites par les modèles. Par contre, elle est limitée par la disponibilité des témoignages qui entraîne dans la plupart des cas l'utilisation des méthodes d'interpolation et d'extrapolation (Raclot 2003).

2.3.5 La méthode pédologique

Selon Cole (1997), ingénieur dans l'armée des États-Unis, le niveau d'eau peut être observé à partir des données botaniques, géomorphologiques et pédologiques. Cette méthode se base sur une étude sédimentologique des échantillons de la terre pour déterminer l'historique du niveau d'eau. Malgré qu'elle soit précise, elle exige beaucoup de travail dans le laboratoire, du matériel et beaucoup de temps pour obtenir les résultats d'une section limitée.

2.3.6 La méthode combinée

Plusieurs chercheurs citent l'importance d'intégrer de nouveaux outils comme les systèmes d'information géographique (SIG) pour aider à gérer les inondations, particulièrement avec des données de télédétection. En effet, les SIG peuvent être utilisés dans la cartographie des zones inondables avec des passerelles entre le SIG et le modèle HEC-2, entre Idrisi et le modèle HEC-RAS ou bien le modèle MIKE 11 (Raclot 2003). Les SIG jouent aussi un rôle important dans les pré-traitements ou post-traitements des données et la prédiction primaire des inondations à partir des mesures limnétiques à l'aide des fonctionnalités d'interpolation linéaire.

Le SIG aide à améliorer l'interprétation des images de télédétection en période de crue, car il permet de gérer plusieurs types de données, ce qui donne des résultats plus précis. De plus, le SIG facilite la vérification et la corrections des erreurs avec la superposition des cartes, en

donnant une vision synoptique plus globale (Brivio et al. 2002). Parfois, si la carte représente des incertitudes limitées, l'utilisation des cartes superposables avec une animation apporte une réponse partielle (Zerger 2002). Généralement, l'utilisation du SIG dans la cartographie des plaines inondables joue un rôle important puisqu'elle permet d'intégrer plusieurs sources de données. Malgré ses multiples avantages, le SIG n'est qu'un moyen pour améliorer l'interprétation des résultats trouvés par d'autres approches, qui ne permet pas de contourner les problèmes liés aux méthodes conventionnelles.

2.4 Délimitation des cotes des crues : Télédétection

La télédétection offre une bonne opportunité pour observer plusieurs événements sur une étendue spatiale plus large, comme les incendies et les inondations (Di Baldassarre 2012). Bien qu'il existe plusieurs méthodes pour délimiter les zones inondées (basées sur l'historique de l'imagerie satellitaire), la télédétection reste un outil inexploré pour délimiter les cotes de crues.

2.4.1 Comportement de l'eau par télédétection et indices de détection de l'eau

Deux types de capteurs existent en télédétection, les capteurs actifs et les capteurs passifs. Les capteurs actifs utilisent la réflexion des ondes émises par le satellite, alors que les capteurs passifs utilisent la réflexion des rayons solaires. L'image ci-dessous explique le comportement de l'eau et d'autres éléments terrestres par la télédétection optique (Figure 2.2).

L'eau est caractérisée par une réflectance relativement plus forte dans le visible (bleu (0.45 - 0.52 μm), vert (0.52 - 0.60 μm), rouge (0.63 - 0.69 μm)), que dans le proche infrarouge (0.76 - 0.90 μm) et les courtes longueurs du proche infrarouge (1.55 – 1.75 μm), considérant les bandes du capteur Landsat TM comme exemple. L'absorption des rayons solaires dans la bande proche infrarouge est complète.

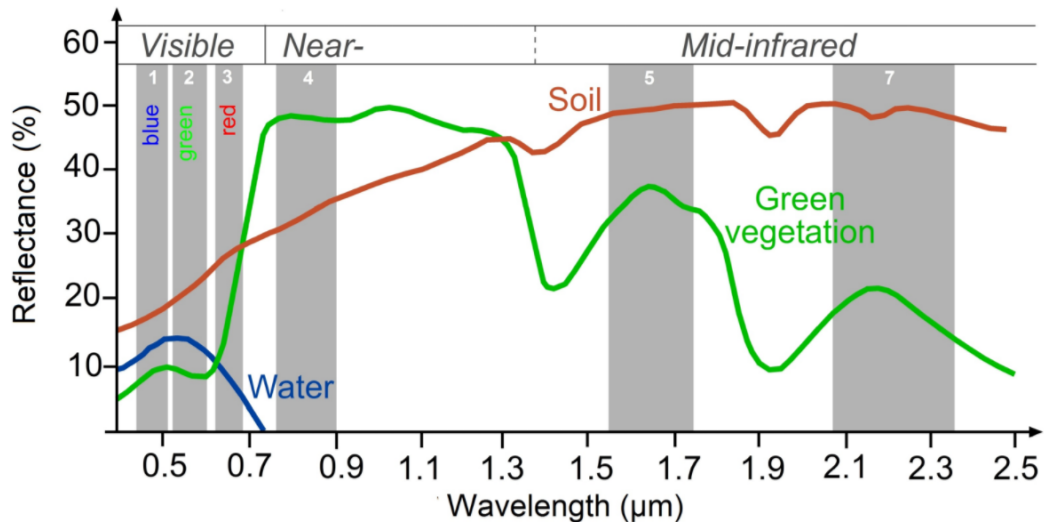


Figure 2.2 : Réflectance de l'eau, de la végétation, et des sols pour les canaux de Landsat TM (European Space Agency)

Plusieurs indices de détection de l'eau sont basées sur ce phénomène comme l'indice normalisé de l'eau (NDWI (Xu 2005)) calculé à partir de la réflectance de deux bandes (verte et proche infrarouge (équation (2-1))) :

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (2-1)$$

Aussi pour l'indice normalisé de l'eau modifié (mNDWI (Xu 2005)) substituant la bande verte par la bande infrarouge (équation 2-2):

$$mNDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR}} \quad (2-2)$$

avec ρ est la réflectance de chaque bande spectrale.

2.4.2 La télédétection des zones inondées

La délimitation d'une zone à risque d'inondation dépend de l'information sur l'*étendue* des inondations et du niveau d'eau, ainsi que sur la *période de retour*. **L'étendue** peut être déterminée à partir d'images aéroportées ou de satellites recueillies lors des événements d'inondation, en traçant les profils d'inondation avec des profils topographiques. **La période de retour** peut également être déterminée grâce à la répétitivité systématique des prises d'image avec des intervalles de temps variables (dépendamment de la résolution temporelle de chaque capteur) pour une région donnée.

Au début, la télédétection a été utilisée pour fournir une source d'informations supplémentaires pour la modélisation des inondations, comme données d'entrée ou bien comme données de validation et d'étalonnage. Depuis les années quatre-vingt-dix les capteurs Radar ont été largement utilisés, puisque leurs microondes peuvent pénétrer les nuages et prendre des images jour et nuit. De plus, ils offrent une information supplémentaire et précise sur l'étendue des zones inondées et sur la géométrie des rivières (Di Baldassarre 2012).

En raison de la complexité du traitement des images Radar et leur coût élevé avant la mise en orbite de Sentinel-1A par l'Agence spatiale européenne en 2014, plusieurs chercheurs ont utilisé les données des capteurs optiques. Par exemple, Thomas *et al.* (2015) ont utilisé les images historiques des capteurs Landsat 5 TM et Landsat 7 ETM+ entre les années 1989 et 2010 pour cartographier les inondations dans le bassin versant de Murray-Darling en Australie, afin de produire des cartes d'inondations. Des données de jaugeage (cumulatifs de 30 jours) ont permis de sélectionner 35 images au cours des périodes des grande inondations et 45 images au cours des périodes des petites inondations. Puis à partir du NDWI et de l'interprétation visuelle de 50 sites, les auteurs ont pu identifier trois classes de pixel : les pixels d'eau ($0.005 < NDWI < 1$), les pixels mixtes ($-0.267 < NDWI < 0.004$) et les pixels des sols et végétations ($-0.618 < NDWI < -0.268$). Pour réduire les erreurs causées par des pixels très brillants, les auteurs ont utilisé un masque basé sur l'indice "sum457" tiré de Beerli and Phillips (2007) via l'équation (2-3). Par contre, étant donné que l'indice de l'eau ne permet pas de différencier les types de végétation (vigoureuse ou sénescence), les auteurs ont utilisé deux indices de végétation NDVI (Tucker 1979) et NDI (Hunt and Rock 1989), équation (2-4) et (2-5) respectivement. Finalement, la cartographie de la zone inondée est représentée par la somme de la zone inondée des trois classes (pixels d'eau, pixels mélangés, végétation). Les zones inondées ont été classées avec une précision globale de 95%.

$$\text{Sum457} = \rho_{NIR} + \rho_{SWIR-1} + \rho_{SWIR-2} \quad (2-3)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Green}}{\rho_{NIR} + \rho_{Green}} \quad (2-4)$$

$$NDI_{B7/B4} = \frac{\rho_{SWIR-2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR-2} + \rho_{NIR}} \quad (2-5)$$

Huang, Chen and Wu (2013) ont cartographié les inondations dans le bassin de Murray-Darling en Australie à partir des séries de jaugeage journalier et historique d'images MODIS entre les années 2001 et 2010. Les données de jaugeage ont permis d'identifier les pics de débit et la probabilité de dépassement. Par la suite, les inondations ont été détectées par les images MODIS à 250 mètres de résolution spatiale pour les dates des pics. Ensuite, les images MODIS ont été validées (Xu 2005) grâce à l'utilisation d'images Landsat de résolution spatiale de 30 mètres, dont l'eau est détectée par l'indice mNDWI,. À partir des images corrigées, dix cartes caractérisant le maximum d'eau à chaque année ont été superposées pour créer une carte de fréquences de l'eau. Ces dernières ont été combinées avec les données de jaugeage pour créer une carte de probabilités d'inondation. Finalement, des cartes d'inondations saisonnières et annuelles ont été élaborées, avec des cartes de probabilités d'inondation (une à cinq possibilités d'inondation à chaque année).

Bien que ces méthodologies (citées ci haut) aident à élaborer des cartes de la variation spatio-temporelle et de probabilités des inondations, elles restent cependant dépendantes des données qui viennent des stations de jaugeage. Il est donc difficile d'appliquer ces méthodes dans des sites où des stations de jaugeage ne sont pas construites. De plus, la résolution spatiale des produits finaux ne permettait pas de délimiter l'étendue de l'eau avec précision ce qui est un facteur limitant pour une application opérationnelle des cotes de crues générées.

Tulbure *et al.* (2016) ont utilisé environ 25 000 images Landsat (TM et ETM+), entre les années 1986 et 2011, pour créer une carte de fréquences d'inondation du bassin versant *Murray-Darling Basin* (MDB) en Australie. Chaque pixel a été traité par 2 modèles pour extraire les nuages et l'eau (Landsat 5 eau, Landsat 5 nuage, Landsat 7 eau et Landsat 7 nuage). Le modèle statistique "*Random Forest*" de type arbre de décisions et non paramétrique, a été appliqué sur l'ensemble des images (Prasad, Iverson, & Liaw, 2006). Les données d'élévation ont été utilisées pour détecter les ombres des collines. Plusieurs indices d'extraction d'eau ont également été utilisés : NDVI, mNDWI, EVI (Huete et al. 2002) (équations (2-6)), NDMI (Gao 1996) (équations (2-7)) et AWEI (Feyisa et al. 2014) (équation (2-8)). Dans cette étude, les chercheurs ont aussi procédé à une délimitation manuelle de la carte de la saison du maximum d'eau des 26 ans. Cette dernière a été utilisée comme produit de validation de la carte produite par l'algorithme du "*Random Forest*". Cette étude cartographique de l'eau de surface et de la dynamique des inondations a

démontré un bon potentiel des images satellites, mais avec une résolution spatiale grossière qui ne permet pas de détecter les petites variations.

$$EVI = 2,5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Green}}{\rho_{TIR} \times 6 \times \rho_{Green} - 7,5 \times \rho_{Blue} + 1} \quad (2-6)$$

$$NDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR-1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR-1}} \quad (2-7)$$

$$AWEI = 4 \times (\rho_{Green} - \rho_{SWIR-1}) - (0,25 \times \rho_{NIR} + 2,75 \times \rho_{SWIR-2}) \quad (2-8)$$

$$WRI = \frac{\rho_{Green} + \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR-1}} \quad (2-9)$$

Sheng *et al.* (2016) ont proposé une approche permettant de détecter la variation temporelle et spatiale de l'eau des lacs, à partir des données historiques (de l'année 2013 jusqu'à 2015) du capteur Landsat-8, en utilisant 3300 scènes qui couvrent l'Australie. Un algorithme appelé "*LakeTime*" a été développé pour sélectionner les images dans la saison optimale (où les lacs sont stables) à l'aide des variables climatiques et hydrologiques afin d'être comparées spatialement et temporellement. En premier lieu, les lacs ont été détectés à partir de l'indice de l'eau NDWI. En deuxième lieu, les nuages dans les images composites ont été filtrés, car ils tendent à sous-estimer la surface des lacs. Ensuite, l'étendue de chaque lac a été affinée à partir d'un histogramme automatisé de segmentation dans diverses conditions (glaces, ombrages, turbidité et végétation). À partir des étendues historiques des lacs, une étendue médiane a été considérée dans la carte finale avec une probabilité d'appartenance à l'eau.

Le travail de Gorelick *et al.* (2017) est parmi les travaux les plus solides en télédétection pour étudier la dynamique de l'eau en utilisant un historique de 3 millions d'images satellitaires des capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI), à l'échelle du globe, pour une période de 32 ans (de 1984 à 2015). L'eau est séparée des autres surfaces par le NDVI et l'indice Hue–Saturation–Value (HSV). La fréquence de l'eau est calculée par mois, par saison et par année, c'est-à-dire le nombre de fois où l'eau a été détectée sur la somme des observations valides à chaque mois. Ces fréquences ont donné une probabilité mensuelle de la surface de l'eau. Pour estimer le changement de l'étendue de l'eau et pour produire les cartes de l'intensité de l'eau, une comparaison a été effectuée entre les probabilités mensuelles et annuelles. Dans cette étude, l'eau est considérée permanente si elle est présente durant les 12 mois de l'année, sinon elle est saisonnière. La validation de la classification a été faite par le calcul des erreurs d'omission et de

commission, à l'aide d'autres images satellitaires et des photographies aériennes (de Google Earth et ESRI) à haute résolution spatiale.

Dans une autre étude, Yamazaki, Trigg and Ikeshima (2015) ont utilisé la fréquence de présence de l'eau à partir des scènes Landsat pour générer une carte mondiale de masse d'eau. La classification de chaque pixel dépend de la valeur de l'indice, de la fréquence et de la pente topographique. Si la valeur de l'indice de fréquence (F_{wi}) est supérieure à 0.7 (équation 2-9), l'eau est considérée permanente. Si la valeur de l'indice est entre 0.1 et 0.7, l'eau est considérée temporelle. Si la pente est supérieure à 5m, le pixel est considéré comme une ombre de relief, sinon le pixel est considéré comme terre. L'indice de fréquence (F_{wi}) est calculé à partir de la probabilité de l'eau ($W_{i,j}$) via l'équation (2-10) et de l'indice de confiance ($O_{i,j}$) :

$$FWi = \frac{\sum O_{i,j} \times W_{i,j}}{\sum O_{i,j}} \quad (2-10)$$

La probabilité de l'eau ($W_{i,j}$) de chaque pixel (i) et à chaque image (j) est calculée à partir d'indice de probabilité (P_{NDWI}) de l'eau et du facteur de correction f_{NDVI} .

$$W_{i,j} = P_{NDWI} \times f_{NDVI} \quad (2-11)$$

où $O_{i,j}$ est l'indice de confiance de l'observation de chaque pixel.

Cet indice de probabilité varie entre 0 et 1, il est égal à 0 s'il n'y a pas de nuages et de neige et est égal à 1 si le taux de nuages et de neige est élevé. Le facteur de correction (f_{NDVI}) est calculé à partir du NDVI, (f_{NDVI}) et est égal à 1 si la valeur de NDVI est inférieure à 0.1 et est égal à 0 si la valeur de NDVI est inférieure à 0.2. Sinon, le facteur de correction est égal à $(0.2 - NDVI) \times 10$. L'indice de probabilité (P_{NDWI}), calculé à partir du NDWI, est égal à 1 si la valeur du NDWI est supérieure à 0.3 et est égal à 0 si la valeur de NDWI est inférieure à 0. Sinon, il est égal à $\frac{NDWI}{3}$. Cette méthode vient avec une erreur globale non négligeable, particulièrement pour les aires de drainage ($< 0.5 \text{ km}^2$) où les sous-estimations sont élevées à cause de la résolution grossière du capteur Landsat (30 mètres).

Rokni *et al.* (2014), quant-à-eux, ont utilisé les images historiques (de 2000 à 2013) des capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI) pour cartographier le lac d'Ourmia, le plus grand au Moyen-Orient. Différents indices (NDWI, mNDWI, l'indice de rapport d'eau (WRI) et NDVI) ont été utilisés afin de suivre la réduction des eaux de surface et l'augmentation de la salinité. Une nouvelle

approche, appelées NDWI-PC basée sur les composantes principales, a été utilisée pour détecter le changement dans la masse d'eau. Cette dernière a été reformulée pour détecter le changement de l'eau de surface. Pour évaluer l'approche, une analyse comparative a été réalisée entre NDWI-PC, NDWI multitemporel, NDVI multitemporel, WRI multitemporel et mNDWI multitemporel. Les analyses de précision ont montré la bonne performance des approches NDWI-PC, du NDWI multitemporel et du NDVI multitemporel avec une précision global de 99,86%, un coefficient Kappa de 0,91. Le NDWI a donné une précision légèrement plus élevée que l'NDWI-PC. Par contre, à chaque fois, le NDWI exigeait un seuil différent pour extraire les bordures du lac.

2.5 Méthodes statistiques

2.5.1 Classification des images satellitaires

Dans le domaine de la télédétection, la classification est une tâche importante afin d'exploiter les images satellitaires. Le but principal de la classification est de regrouper les données similaires pour obtenir un ensemble de groupes en se basant sur l'homogénéité et l'hétérogénéité.

Les modèles de classification permettent de regrouper un ensemble de données ayant des caractéristiques spectrales similaires, via des algorithmes, comme le maximum de vraisemblance. D'autres algorithmes sont basés sur le principe inverse en regroupant les pixels avec des critères de dissimilarité. Les modèles de classification peuvent être séparés en deux groupes : les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification non supervisée (Beliakov and King 2006).

La classification Fuzzy c mean (FCM), une classification non paramétrique et non supervisée, dite douce, permet de fournir une information essentielle au-delà d'un nombre numérique lui-même. Cette classification permet aux données individuelles d'avoir une appartenance partielle aux différentes catégories. Par conséquent, la discrimination spatiale est conclue sans définir des frontières claires (Fan, Han, and Wang 2009).

La classification FCM est employée par divers chercheurs. D'ailleurs, Chiu and Couloigner (2006) ont utilisé la classification FCM modifiée pour cartographier les zones humides à partir de l'imagerie satellitaire (ETM+). Cette classification a permis d'identifier les zones de transition avec une précision améliorée par rapport au classificateur FCM standard, et ce, avec les valeurs d'appartenance à chaque catégorie. Zhang *et al.* (2004) ont comparé la classification floue non supervisée pour identifier l'habitat écologique dans les forêts par rapport aux méthodes statistiques traditionnelles. De même, Lucas, Shanmugam and Sanjeevi (2002) ont appliqué la

classification FCM pour cartographier l'habitat sous-pixel à partir des données des photographies aériennes.

2.5.2 Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction basée sur l'étude d'un phénomène passé, afin de calculer la probabilité d'une apparition future. Cette dernière est basée sur les étapes présentées dans la Figure 2.3.

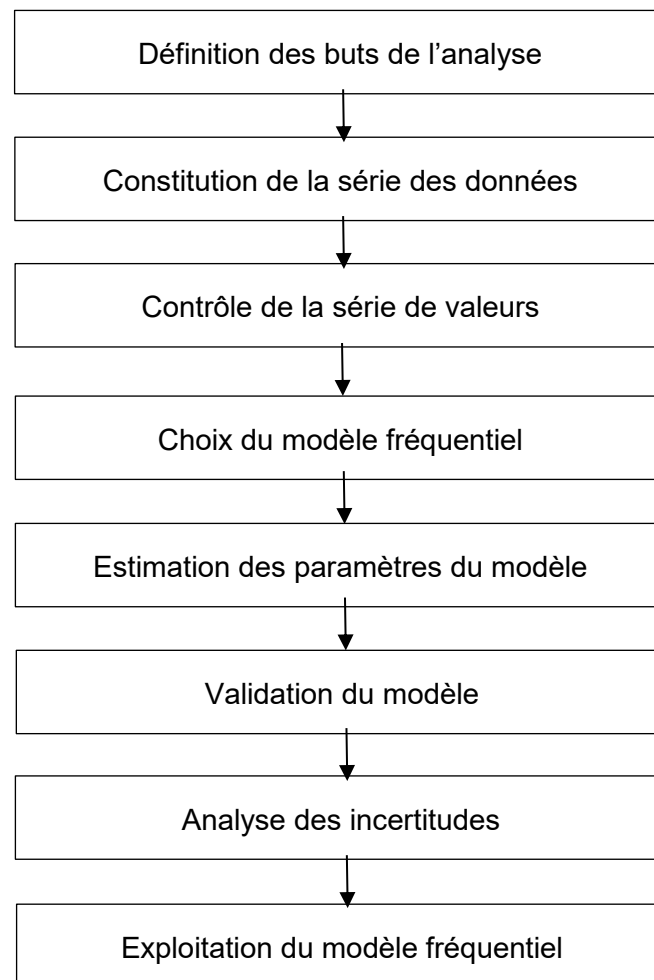


Figure 2.3 : Les étapes principales de l'analyse fréquentielle (Meylan, Favre and Musy, 2008b)

Plusieurs chercheurs ont utilisé l'analyse fréquentielle, dans différents domaines d'étude. Notamment, Benkhaled *et al.* (2014) ont proposé l'analyse fréquentielle pour étudier le phénomène de la sécheresse dans la région de Biskra en Algérie par le biais des données de la concentration des sédiments en suspension collectée en amont du barrage Foug El Gherza de 1979 à 1991. Dans le but d'aider les gestionnaires des barrages à évaluer le potentiel d'envasement, quatre étapes ont lieu. Premièrement, analyser les valeurs aberrantes. Deuxièmement, vérifier les hypothèses de base (indépendance, homogénéité et stationnarité). Troisièmement, sélectionner une distribution de probabilité non stationnaire (exponentielle, Log Normal, Weibull ou Gamma). La dernière étape consiste à évaluer les risques de futurs envasements à partir des quantiles extraits des modèles de distribution. Cependant, Chokmani and Ouarda (2004) ont employé l'analyse fréquentielle sur les données hydrologiques provenant de 151 stations de jaugeages situées dans le sud de la province de Québec, afin d'estimer les quantiles de crues correspondant aux périodes de retour sur 10, 50 et 100 ans. Deux techniques de validation ont été utilisées, soit la validation croisée et la validation sur des échantillons fractionnés. La méthode d'estimation régionale de corrélation canonique donnent des résultats satisfaisants, d'une précision allant jusqu'à 78 %.

De même, Tao *et al.* (2016) ont proposé l'analyse fréquentielle pour prédire l'épaisseur de la glace de mer de la baie de Liaodong, dans la mer de Bohai. Les auteurs utilisent la méthode d'optimisation de particules afin d'estimer les paramètres de distribution à entropie maximale. Le test Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour valider le choix de la distribution avec les données de terrain pour un niveau significatif de 0.05 (Justel, Peña, and Zamar 1997).

De plus, Ouarda et El-Adlouni ont utilisé un modèle d'analyse fréquentielle non stationnaire dans le domaine hydrologique. Un modèle bayésien a été employé pour estimer des quantiles hydrologiques avec une condition de non-stationnarité (Ouarda and El-Adlouni 2011). En outre, Gignac, Bernier and Chokmani (2018) ont utilisé les images micro-ondes passives (de 1978 à 2015) afin de prédire la concentration de glace à la baie d'Hudson dans le nord-est du Canada (projet IcePAC), et ce par le biais d'un modèle numérique d'analyse fréquentiel. La loi statistique Beta a été choisie pour estimer la probabilité d'occurrences futures, après la validation de test non paramétrique Kolmogorov-Smirnov. L'homogénéité a été validée par le test de Wilcoxon (Wilcoxon 1946). Alors que, la stationnarité a été validée par deux tests : Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975) et KPSS (Kwiatkowski et al. 1992) avec un degré de tolérance $\alpha = 0.05$.

3 MÉTHODE ET MATÉRIELS

3.1 Zone d'étude

La zone d'étude est située dans la municipalité régionale de comté de Papineau (MRC de Papineau) qui fait partie de la région administrative de l'Outaouais (Québec). La zone est située sur la rive nord de la rivière des Outaouais, entre les longitudes 74° 56' à 75° 15' ouest et les latitudes 45° 34' à 45° 44' nord. Cette région est caractérisée par la présence de la rivière Petite Nation, avec des berges non protégées contre les inondations, d'une longueur de 132 km et d'une superficie totale de 2250 km² de bassins versants et est la source principale du lac des Grandes Baies (situé au nord de la rivière de l'Outaouais). Le bassin versant de la rivière Petite Nation compte environ 17 500 habitants alors que la rivière a une largeur moyenne de 40 m. La zone d'étude présentée en jaune dans la Figure 3.1 (MRC de Papineau 2004).

La zone d'étude joue un rôle important dans l'économie de la région, grâce à ses activités agricoles et touristiques basées sur l'histoire de la région. Près de 29 % de sa population vit en zones urbaines, installées près des rives de la rivière. Cette dernière est caractérisée par trois sections principales homogènes : 1) le *sud* avec une longueur de 10 km, caractérisée par des embouchures, 2) le *centre* avec une longueur de 64 km, situé entre le pont Cook et le barrage du lac Simon, caractérisé par une vallée qui emporte à activités agricoles importantes et 3) le *nord*, avec une longueur de 62 km, située en amont du barrage du lac Simon (MRC de Papineau 2004). La zone d'étude est située dans la section sud, avec un débit moyen de 22.5 m³/s et un débit maximum de 91.92 m³/s. Topographiquement, cette section est une plaine, caractérisée par une pente moyenne de 0.029 m/km. Elle est également connue par plusieurs inondations récurrentes inattendues durant les 35 dernières années, causées parfois par des précipitations intensives et d'autres fois par la fonte de la neige. Les crues dans ce secteur touchent le domaine urbain et rural, dont la réalité des événements sur terrain ne correspondent pas toujours aux prévisions météorologiques.

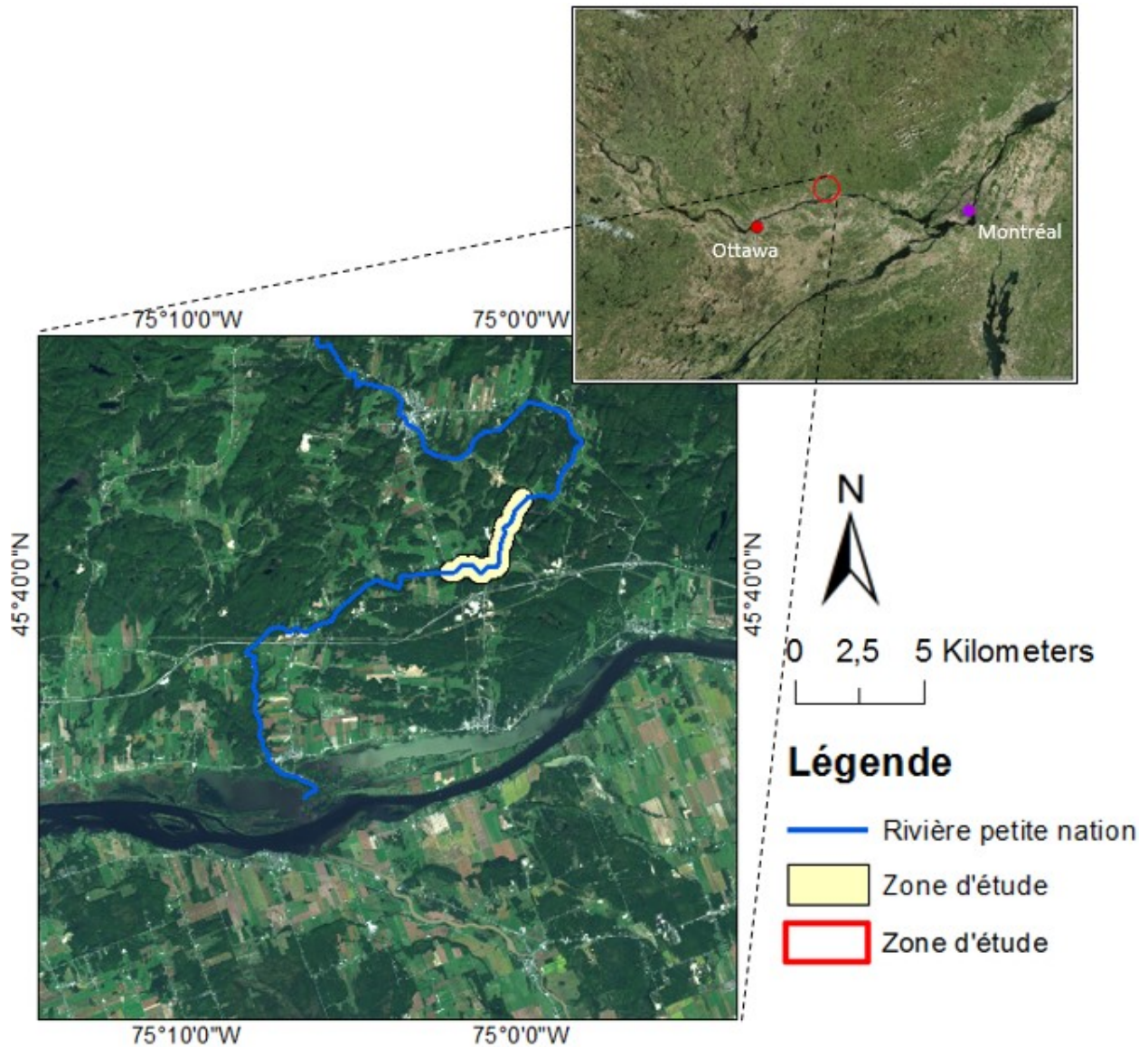


Figure 3.1 : Présentation de la zone d'étude dans la rivière Petite Nation située entre Montréal et Ottawa

Comme le montrent les images (Figure 3.2 à 3.3) ci-dessous, ces catastrophes causent beaucoup de dégâts : maisons inhabitables, coupures du courant d'électricité et régions inaccessibles. Pour en faire face, la MRC de Papineau mobilise beaucoup d'équipements (sacs de sable, pompes, hélicoptères, etc.) et de ressources humaines. Sauf que, dans plusieurs cas (comme dans les

années 1972 et 2017), les dirigeants se sont trouvés face à un manque d'équipements et de ressources humaines (Colloque régional sur la sécurité civile de 2010) .



Figure 3.2 : Inondation de la Petite Nation en 1972



Figure 3.3 : Inondation de la Petite Nation en 2017 (ICI Radio-Canada)

3.2 Présentation des données

3.2.1 Les capteurs Landsat

En raison de leur disponibilité historique (à partir de 1982) les images de la série des capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI) ont été choisies pour aboutir aux fins de ce projet. En effet, ce capteur offre le plus long enregistrement gratuit et disponible qui permet d'étudier des phénomènes récurrents tels les périodes de retour des inondations. De plus, ses résolutions (spatiale, spectrale et temporelle) répondent aux exigences de la surveillance thématique et au changement des composantes terrestre (Chander, Markham, and Helder 2009).

Le programme Landsat a commencé en juillet 1972, avec le lancement de la première plateforme Landsat-1. Grâce à l'avancement technologique et à la demande d'une meilleure qualité, d'autres plateformes ont été lancées (Landsat-2, 3, 4, 5, 6, 7, et Landsat-8). Sauf que, le lancement de Landsat-6 n'a pas été réussi en 1993. De plus, un problème technique dans le balayeur du capteur Landsat-7 (ETM+) a eu lieu le 31 mai 2003 et a causé des anomalies dans les images subséquentes. C'est pourquoi les images de Landsat-7 capturées après mai 2003 ont été éliminées de l'ensemble des images historiques. Les résolutions spatiale et temporelle ont été améliorée dans les plateformes de Landsat-4 au Landsat-8: le cycle est devenu 16 jours au lieu de 18 jours et la résolution spatiale est devenue 30 mètres au lieu de 60 mètres après rééchantillonnage (USGS 2018). Les tableaux (Tableau 3.1, Tableau 3.2, Tableau 3.3 et Tableau 3.4) ci-dessous représentent les caractéristiques des capteurs Landsat : longueur d'ondes, résolution spatiale et temporelle ainsi que leur comparaison.

Tableau 3.1 : Caractéristiques spatiales et spectrales des capteurs Landsat 4-5 (USGS, 2018b)

Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)		
Bandes	Longueur d'ondes (μm)	Résolution (mètres)
1 - Blue	0.45 – 0.52	30 m
2 - Green	0.52 – 0.60	30 m
3 - Red	0.63 – 0.69	30 m
4 - NIR	0.76 – 0.90	30 m
5 - SWIR-1	1.55 – 1.75	30 m
6 - Thermal	10.40 – 12.50	30m (après rééchantillonnage)
7 - SWIR-2	2.08 – 2.35	30 m

Tableau 3.2 : Caractéristiques spatiales et spectrales du capteur Landsat 7-ETM+ (USGS, 2018b)

Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)		
Bandes	Longueur d'ondes (µm)	Résolution (mètres)
1 - Blue	0.45 – 0.52	30 m
2 - Green	0.52 – 0.60	30 m
3 - Red	0.63 – 0.69	30 m
4 - NIR	0.76 – 0.90	30 m
5 - SWIR-1	1.55 – 1.75	30 m
6 - Thermal	10.40 – 12.50	30 m (après rééchantillonnage)
7 - SWIR-2	2.08 – 2.35	30 m
8 - Panchromatic	0.52 – 0.92	15 m

Tableau 3.3 : Caractéristiques spatiales et spectrales du capteur Landsat 8-OLI/TIRS (Barsi et al., 2014)

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)		
Bandes	Longueur d'ondes (µm)	Résolution (mètres)
1-Ultra (côtier/aérosol)	0.435 – 0.451	30 m
2 - Blue	0.452 – 0.512	30 m
3 - Green	0.533 – 0.590	30 m
4 - Red	0.636 – 0.673	30 m
5 - NIR	0.851 – 0.879	30 m
6 - SWIR-1	1.566 – 1.651	30 m
7 - SWIR-2	2.107 – 2.294	30 m
8 - Pan	0.503 – 0.676	15 m
9 - Cirrus	1.363 – 1.384	30 m
10 – TIRS 1	10.60 – 11.19	30 m (après rééchantillonnage)
11 – TIRS 2	11.50 – 12.51	30 m (après rééchantillonnage)

Tableau 3.4 : Comparaison entre les caractéristiques de chaque satellite (USGS, 2018b)

Satellite	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Heure d'acquisition locale
Landsat-1 à 3	18 jours	79 m	9 h 45
Landsat-4 et 5	16 jours	30 m	9 h 30 -10 h
Landsat-6	-	-	-
Landsat-7	16 jours	30 m	10 h – 10 h 15
Landsat-8	16 jours	30 m	10 h

Les images Landsat ont été téléchargées du site web <http://glovis.usgs.gov/> de l'agence gouvernementale américaine USGS. La plateforme de l'agence offre des images corrigées géométriquement. Afin d'augmenter le nombre d'images Landsat, deux tuiles d'images (Figure 3.4) qui chevauchent la zone d'étude ont été utilisées dans ce projet. Le nombre total des images Landsat téléchargées était de 1729 (Tableau 3.5).

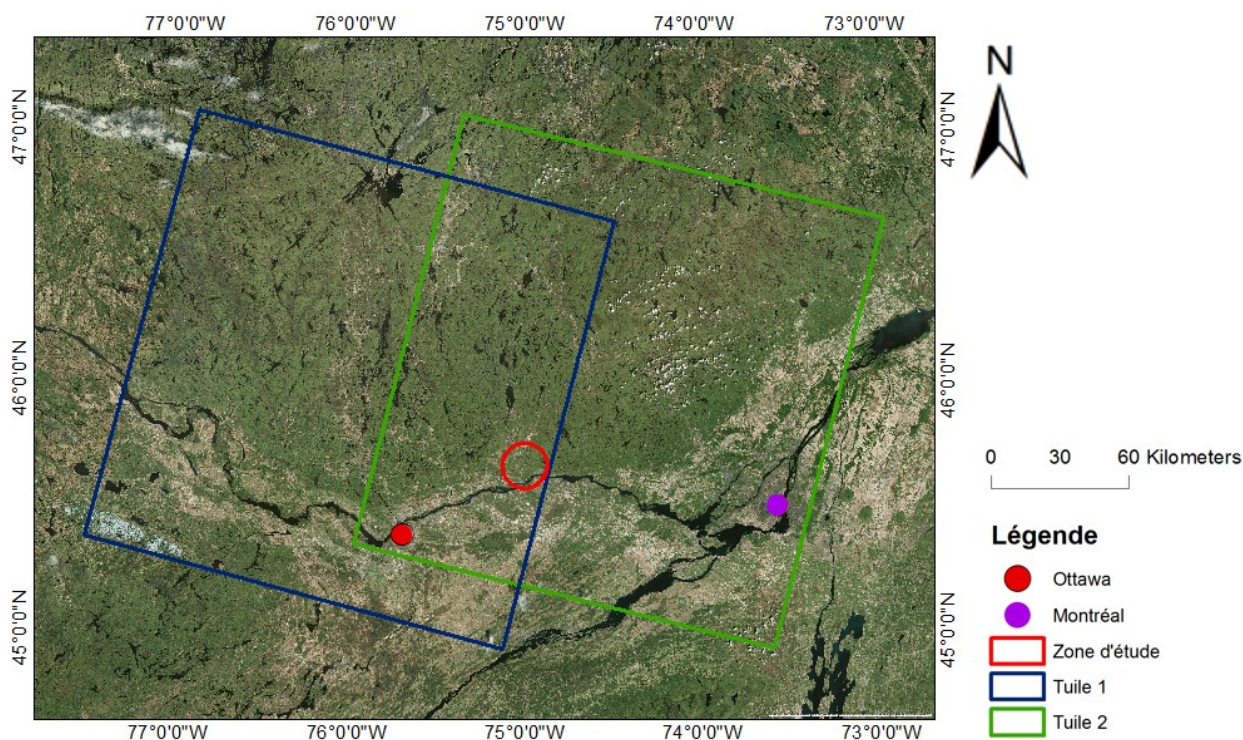


Figure 3.4 : Position géographique de la Tuile 1 et Tuile 2 par rapport à la zone d'étude

Tableau 3.5 : Caractéristiques géographiques des images Landsat utilisées pour délimiter les côtes de crues

Tuile	Localisation		Nombre d'images
	Path	Raw	
Tuile 1	16	28	895
Tuile 2	15	28	834

3.2.2 Données d'élévation

Dans ce projet, les données d'élévations ont été téléchargées du site web : <https://geoegl.msp.gouv.qc.ca/igo/mffpecofor/> du gouvernement du Québec. Les caractéristiques de ces données sont les suivantes : elles proviennent des données LiDAR avec une résolution spatiale de 1 mètre, le type de maillage est triangulaire et ne prennent pas en compte ni les bâtiments ni les arbres. Cependant, les données du HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) ont été favorisées pour la présente étude puisqu'elles permettent d'élaborer des cartes topographiques en fonction des altitudes relatives au réseau hydraulique. Par conséquent, les cartes montrent le potentiel gravitationnel relatif et local de l'eau de la rivière par rapport au sol. Le HAND a été validé pour la première fois sur une superficie de 18 000 km² dans le bassin versant Rio Negro. Il a démontré sa robustesse lorsqu'il est appliqué à des bassins versants non jaugés (A. D. Nobre et al. 2011). Le modèle HAND a été développé et appliqué par la suite dans plusieurs études. On donne trois cas d'études : 1) Kesler (2017) a utilisé le modèle HAND pour générer des cartes d'inondations en temps réel dans le comté de Tavis, au Texas. Grâce aux prévisions de débit produites par le modèle national de gestion de l'eau, une application en ligne a été créée pour déterminer le moment où elle sera inondée ; 2) Chow, Twele and Martinis (2016) ont utilisé l'indice quasi-global extrait des données HAND pour masquer les zones à faible probabilité d'occurrence d'inondation en utilisant les images Radar afin de bien identifier les zones inondées ; et 3) Mcgehee (2017) a modifié le HAND à l'aide de la commande "flux", afin de mieux repérer les inondations complexes, comme l'effet de remous des bassins de captage adjacents et en aval de la rivière.

3.2.3 Données de validation

Les données de validation (Figure 3.5) utilisées dans ce projet sont les cotes de crues délimitées par le gouvernement du Québec. Elles ont été obtenues par le logiciel HEC-RAS, suite à une étude hydrologique et hydraulique. Les débits de crues de référence sont retenus à partir de la technique régionale et statistique, en se basant sur l'historique de quatre stations hydrométriques (040402, 040406, 040202 et 040204 (Centre d'expertise hydrique du Québec 2008)). Les cotes de crues de 2, 20 et 100 ans générées par le ministère de l'Environnement (PDCC 07-008) ne sont pas continues le long de la rivière, puisque le gouvernement du Québec a focalisé les études sur des zones bien déterminées lors de la délimitation.

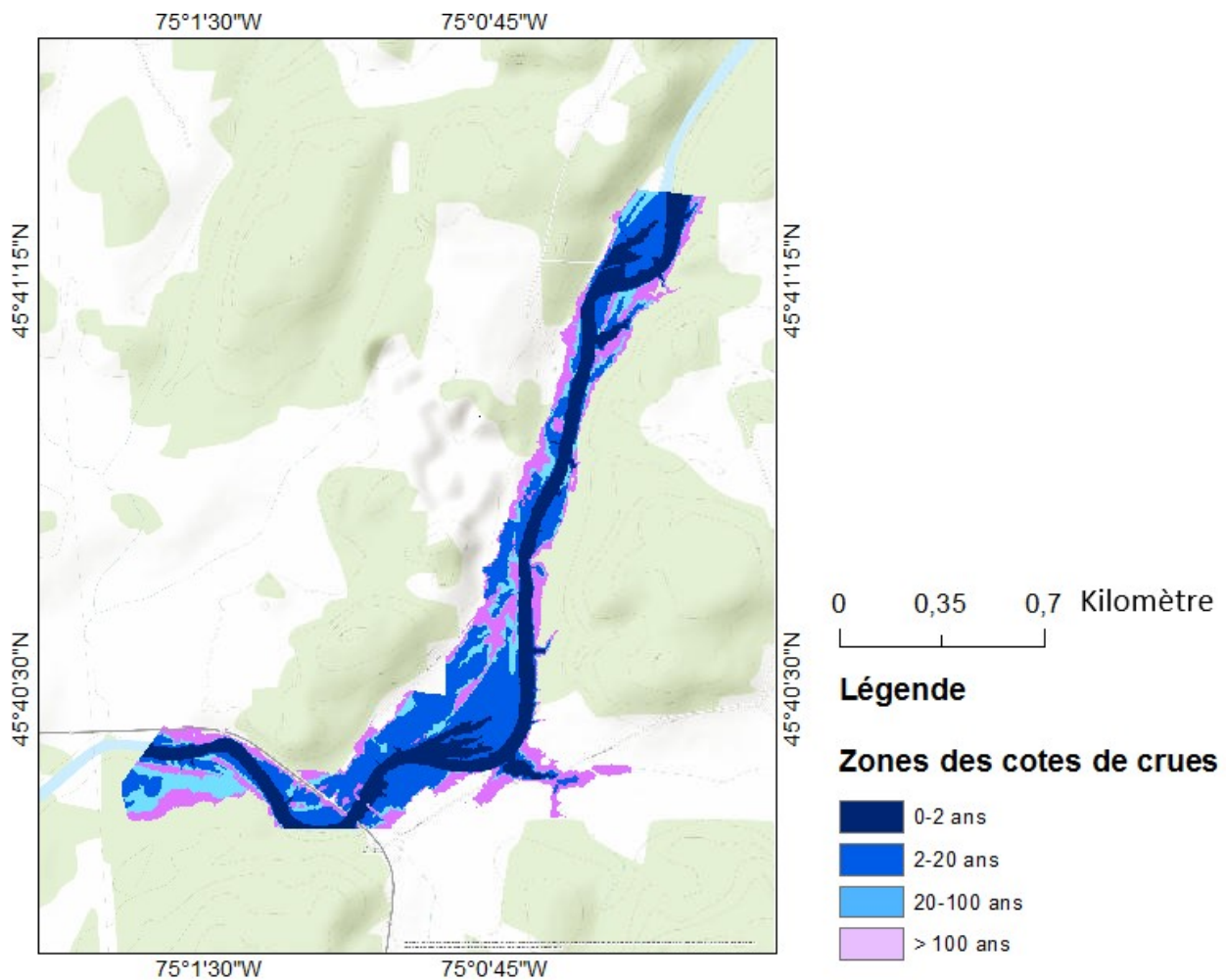


Figure 3.5 : Présentation des cotes de crues de référence délimitées par le gouvernement du Québec

3.3 Approche méthodologique

3.3.1 Concept méthodologie

La délimitation des cotes de crues de la zone d'étude est passée par plusieurs étapes successives qui sont résumées dans l'organigramme illustré à la Figure 3.6.

Étape 1 : Prétraiter (découpage de la zone d'étude, correction radiométrique et correction atmosphérique) les images Landsat. Cette étape, essentielle, permet d'uniformiser les données afin de les traiter de la même façon et d'extraire l'information d'intérêt (identification de l'étendue spatiale de l'eau dans les zones de crues) d'une image à une autre.

Étape 2 : Produire des cartes composites annuelles des maxima du NDWI qui représentent l'étendue annuelle maximale de l'eau, à 30 mètres de résolution spatiale.

Étape 3 : Estimer, à partir de la composite annuelle des maxima du NDWI, la probabilité d'appartenance à la classe d'eau via la technique de classification Fuzzy-c means.

Étape 4 : Élaborer, à partir des cartes de probabilité d'appartenance, des cartes de probabilités d'occurrences de l'eau pour différentes périodes de retour (2, 20 et 100 ans) en utilisant une analyse fréquentielle.

Étape 5 : Désagréger, à partir des données HAND, la résolution spatiale des cartes de probabilités d'occurrences de l'eau de 30 mètres au mètre (1) en exploitant le principe physique de la gravitation terrestre.

Étape 6 : Valider, à partir des cotes de crues délimitées par le gouvernement du Québec, la précision de la méthodologie par une matrice de confusion.

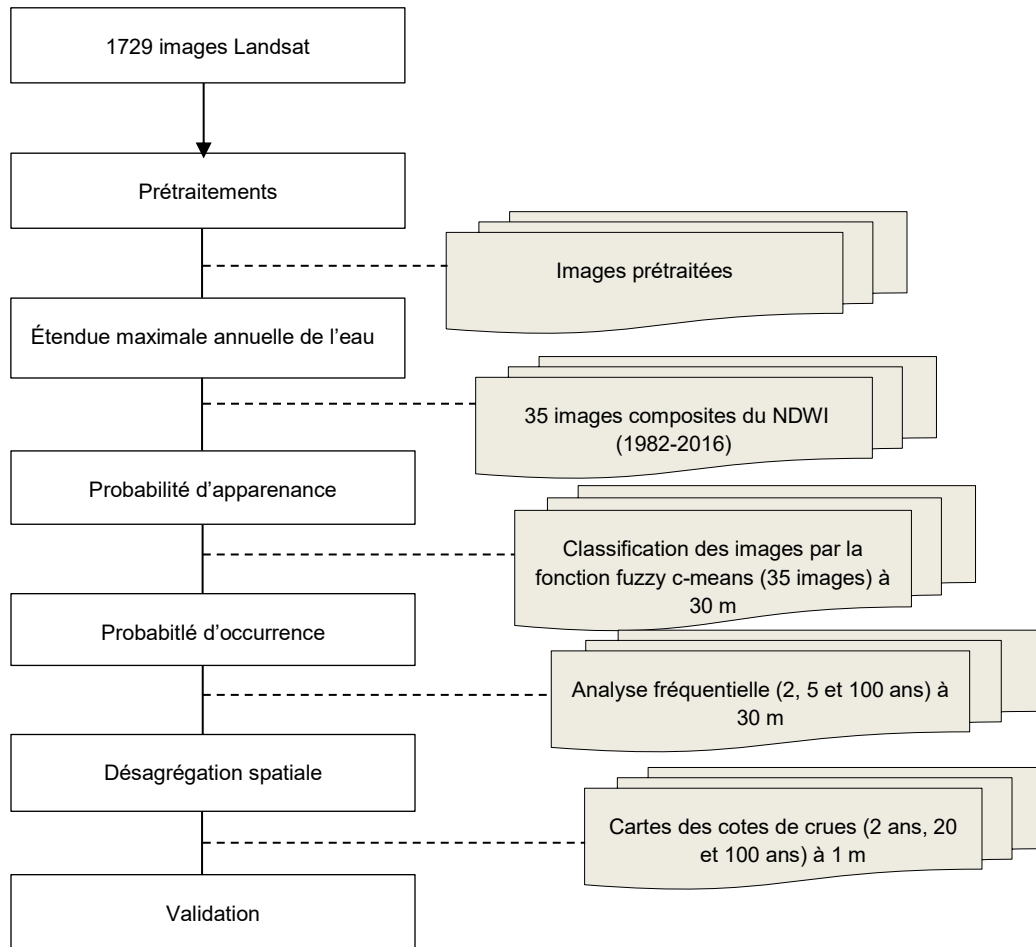


Figure 3.6 Organigramme méthodologique de la délimitation des cotes de crues.

3.3.2 Prétraitement des images satellitaires

3.3.2.1 Correction radiométrique

L'objectif de la correction radiométrique est de transformer les comptes numériques (CN) en luminance via l'équation (3-1). Ces dernières sont conclues à partir des courbes d'étalonnages, établies avant le lancement des satellites.

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{max} - L_{min})}{2^{bit} - 1} \times CN + L_{min} \quad (3-1)$$

avec : L_{λ} est la luminance apparente d'une longueur d'onde donnée (λ), L_{max} est la luminance maximale, L_{min} est la luminance minimale et CN est le compte numérique. Ces paramètres sont disponibles dans le fichier métadatas de chaque image Landsat.

3.3.2.2 Correction atmosphérique

Le but de la correction atmosphérique est de calculer la réflectance réelle (REF) au niveau du globe terrestre à partir de la luminance apparente (équation(3-2)). Pour ce faire, il est nécessaire d'éliminer l'effet des facteurs atmosphériques sur la réflectance détectée par le capteur. Le COST est, à date, le plus adéquate et le plus précis des algorithmes dites « *Image based* » pour corriger atmosphériquement les images satellites, notamment du capteur Landsat. Les variables de cet algorithme sont : la luminance apparente (L_λ), la luminance diffusée dans la direction du capteur et son champ de vue (L_{haze}), l'irradiance solaire exoatmosphérique moyenne ($ESUN_\lambda$), l'angle zénithal (θ_s) en degré et la distance terre-soleil (unité astronomique) (Choi, Won, and Lee 2008).

$$REF = \frac{\pi \times d^2 (L_\lambda - L_{haze})}{(ESUN_\lambda \times \cos\theta_s \times \cos\theta_s)} \quad (3-2)$$

L_{haze} est calculé à partir de la méthode "dark object", qui considère que le pixel de réflectance le plus élevé, qui est parmi 1 % des pixels de réflectance la plus faible dans l'image, est un pixel noir de réflectance très faible. Donc la valeur lue par le capteur de ce pixel (supérieur à 1 %) provient de l'effet additif de l'atmosphère. Par conséquent, il faut soustraire la valeur du L_{haze} de l'histogramme des luminances apparentes, afin de réduire cet effet additif (Chavez 1988).

Les corrections atmosphériques et radiométriques, ainsi que le traitement des images historiques sont faits par une programmation sur le logiciel Matlab.

3.3.3 Traitement des images historiques Landsat TM/ETM+ et OLI

Le traitement des images Landsat a commencé par le calcul du NDWI pour chaque date. Le NDWI est compris entre -1 et 1, alors que l'intervalle de la classe « eau » est comprises entre 0 et 1. L'handicap majeur d'utilisation des données issues des capteurs optiques est la présence des nuages parcequ'il est difficile, voire impossible, de détecter la surface terrestre au travers. Également, sur le produit NDWI, les nuages et leurs ombres apparaissent comme des zones humides (valeurs élevées (Figure 3.8)). Les nuages et leurs ombres entâchent d'erreurs les limites de la rivière et des zones humides. Par conséquent, il a été nécessaire de masquer ces régions-là.

L'algorithme de classification développé par l'USGS, nommé BQA (*Bands Quality Assessment*), permet l'identification des pixels affectés par les nuages et leurs ombres. Chaque image Landsat téléchargée vient avec un produit de classification de format Géotiff (appelé BQA), auquel une valeur est assignée à chaque pixel qui indique la nature d'un élément terrestre donné (terre,

nuage, eau, ..., etc.). À l'aide de ce masque, les pixels des nuages et de leurs ombres ont été identifiés et masqués.

3.3.4 Étendue maximale annuelle de l'eau

L'étendue maximale annuelle de l'eau a été obtenue à l'aide d'une image composite annuelle des maxima du NDWI, produite à partir de l'ensemble des produits NDWI d'une année donnée. Au final, 35 images composites annuelles de résolution spatiale de 30 mètres, correspondantes aux 35 années d'études (de 1982 à 2016), ont été générées. La Figure 3.7 illustre un exemple de la production d'une carte composite des maxima du NDWI : la première étape consiste à calculer le NDWI pour l'ensemble des images d'une année (x) et la deuxième étape consiste à sélectionner la valeur la plus élevée du NDWI pour chaque pixel pour les différentes dates de la même année. Cette exercice a permis d'identifier l'étendu maximal de l'eau des rivières durant une année donnée.

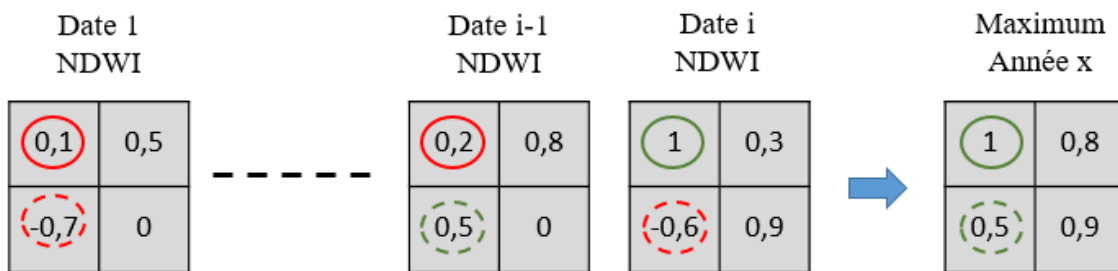


Figure 3.7 : Exemple de la carte composite annuelle

Après vérification visuelle, il a été remarqué que des traces de nuages persistaient, et ce pour toutes les images composites, à cause des erreurs d'omission de la classification des nuages dans le produit BQA pour certaines images. De ce fait, il a été décidé d'écarter les images problématiques.

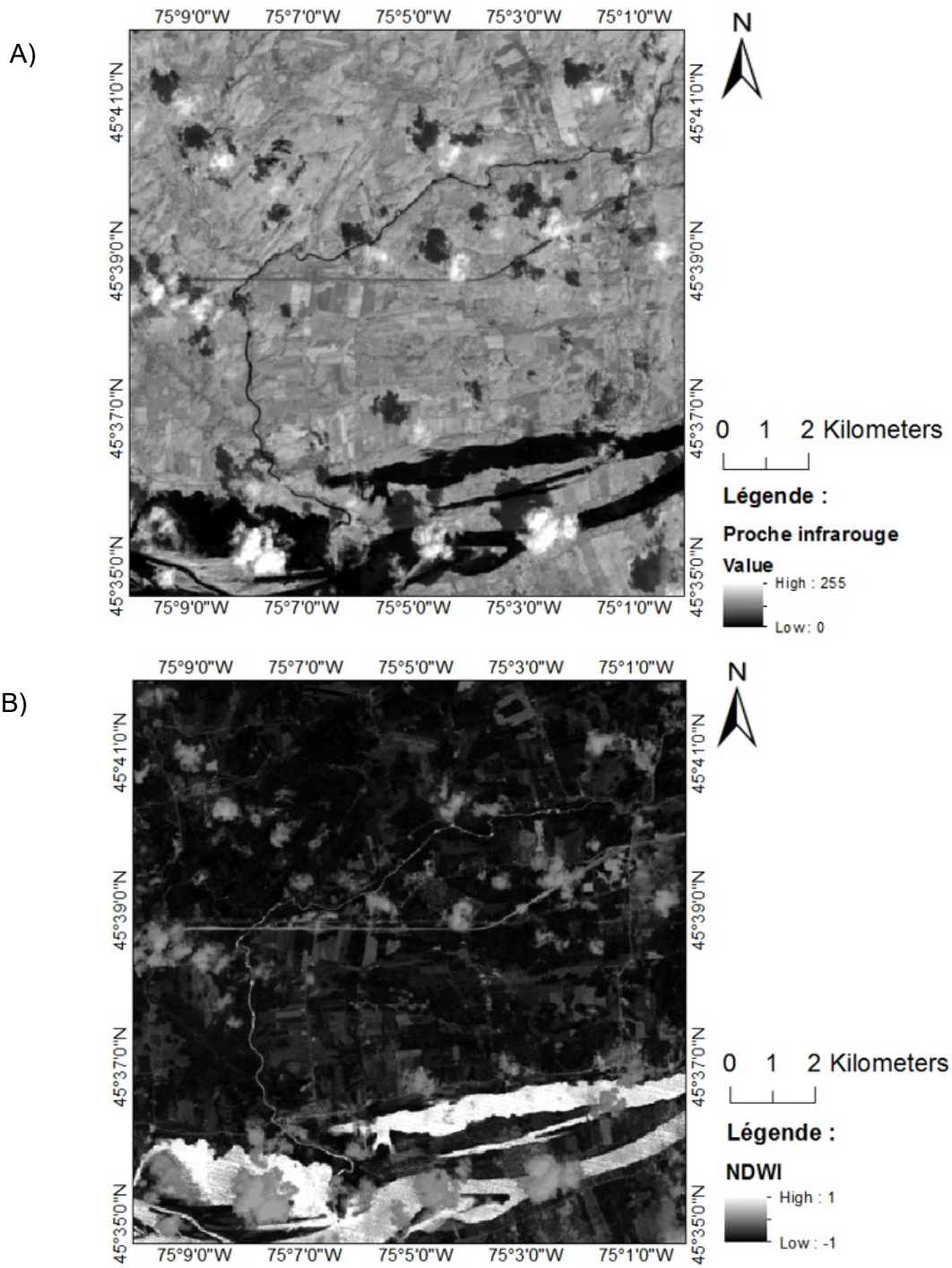


Figure 3.8 : Effets des nuages et leurs ombres : A) dans la bande proche infrarouge et B) via le NDWI (B) de l'image Landsat-5 pris le 29 d'août 2011

3.3.5 Classification Fuzzy-c means

La classification des images composites a été effectuée via l'algorithme de Fuzzy c-means (FCM) (Bezdek 1981). Ce dernier se base sur le degré d'appartenance de chaque pixel à une classe donnée ; dans notre cas : classe d'eau et classe de la terre. Comme montre l'histogramme (Figure 3.9), les deux classes sont identifiées à partir des centres de nuages des deux classes : une valeur faible de NDWI pour la classe « terre » ainsi qu'une valeur élevée de NDWI pour la classe « eau ». Le degré d'appartenance de chaque pixel est calculé par rapport au centre de chaque classe.

Au début, l'algorithme fait une estimation initiale pour identifier les centres des classes. Chaque pixel est affecté par un poids d'appartenance. Ensuite le programme recalcule les centres des classes en tenant compte du niveau d'appartenance de chaque élément. La fonction principale de la FCM utilise plusieurs variables telles que : le nombre de points (D), le nombre de classes (N), la matrice (m) qui contrôle le degré de chevauchement des classes en comptant le nombre significatif des points qui ont une appartenance à plus d'une classe ; le $i^{\text{ème}}$ données (x_i), le $j^{\text{ème}}$ classe (c_j) de l'équation (3-2) et le degré d'appartenance (μ_{ij}) de l'équation (3-3) de chaque pixel (x_i).

Pour initier, des valeurs d'appartenance (μ_{ij}) sont affectées aléatoirement à chaque pixel et par la suite les centres de chaque classe sont calculés avec la formule de (c_j)

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^D \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^D \mu_{ij}^m} \quad (3-2)$$

La troisième étape est l'ajustement de l'appartenance de chaque pixel par la fonction (μ_{ij}) et le calcul du coefficient de contrôle (J_m) via l'équation (3-4) :

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3-3)$$

$$J_m = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (3-4)$$

La fonction répète les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que le coefficient de contrôle soit optimale (atteinte d'un seuil minimal) ou épuisement du nombre d'itérations spécifié. Dans ce cas d'étude, le nombre des classes (N) est égal à 2, le nombre total de points (D) est égal 449085.

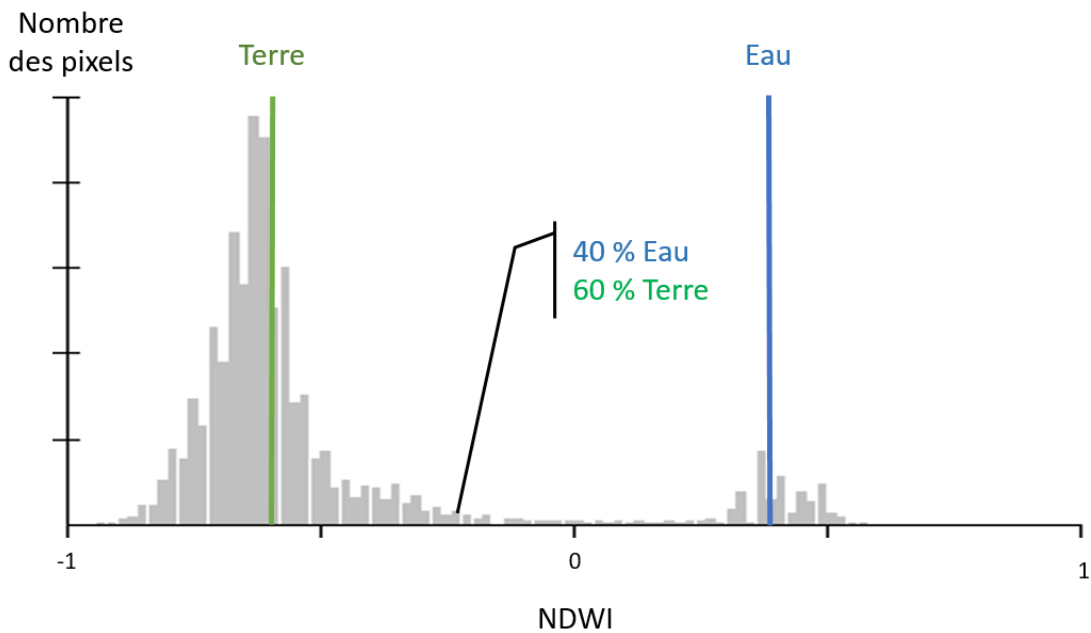


Figure 3.9 : Exemple de la classification d'un pixel par rapport aux deux classes : terre et eau

3.3.6 Analyse fréquentielle

Le contrôle des séries de données a été fait visuellement, à partir de l'image correspondante à chaque date et à partir des images composites annuelles. Deux types de comportements dans les séries temporelles des pixels a été remarqué : **stable**, où les pixels ont le même comportement au cours des années étudiées, ils font partis des régions dont l'existence de l'eau ou de la terre est permanente et **variable**, qui représentent les pixels où l'eau n'est pas permanente mettant en évidence les zones inondées et les zones transitoires (zones humides).

Comme montre la Figure 3.11, les données d'entrée sont les images composites annuelles d'eau classées par l'algorithme Fuzzy c-means. Chaque pixel est caractérisé par 35 valeurs provenant des images maximums classifiées, afin d'aider à construire un modèle de répartition par le biais des deux paramètres α et β .

Les images utilisées dans ce projet ont été prises à des dates différentes par les capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI) d'une manière indépendante. Les images sont prétraitées et traitées par les mêmes algorithmes pour aboutir à un indice normalisé (le NDWI), donc ces images proviennent de la même population et par conséquent elles sont homogènes. Ces images visent à détecter le phénomène d'inondation, qui est variable dans le temps et dans l'espace, particulièrement dans le contexte de changements climatiques vécu actuellement. Bien que l'homogénéité et

l'indépendance des données soient évidentes, des tests statistiques ont été élaborés pour valider les trois conditions (homogénéité, indépendance, stationnarité) d'une analyse fréquentielle.

Pour évaluer l'indépendance de la série, le test de Wald-Wolfowitz (Wald and Wolfowitz 1943) a été utilisé. L'homogénéité est testée par le test de Wilcoxon (Wilcoxon 1946). La stationnarité a été testée par deux tests : Mann-Kendall (Kendall 1975; Mann 1945) et KPSS (Kwiatkowski et al. 1992). Ces derniers sont des tests non paramétriques et bilatéraux, avec un degré de tolérance $\alpha = 0.05$ qui tient compte du phénomène dynamique d'inondation.

La loi statistique bêta a été favorisée pour estimer les probabilités d'occurrences futures de l'eau à chaque pixel. Elle fait partie de la famille des lois de probabilités continues bornées, définie sur l'intervalle $[0 - 1]$, ce qui correspond à l'intervalle de la concentration de l'eau (entre 0% et 100%). Cette distribution est régie par deux paramètres qui sont α et β . Comme représentés dans les deux images ci-dessous (Figure 3.10), ces paramètres permettent de tracer plusieurs distributions très variées de la fonction de densité et de la fonction de répartition. Étant donné que le nombre des distributions bornées utilisables et adéquates est limité, la distribution bêta est fortement recommandée pour modéliser les phénomènes environnementaux, telles les inondations. Cette loi a également été utilisée avec succès dans plusieurs autres domaines, notons en : hydrologie (Chen and Singh 2017; Yao and Yao 1974; De Moel, Asselman, and Aerts 2012), climatologie (Dirkson 2017; Falls 1974; Henderson-Sellers 1978; Sulaiman et al. 1999), sismologie (Lallemant and Kiremidjian 2015) et pollution de l'air (Nadarajah 2007).

Le test Kolmogorov-Smirnov (KS) est un test non paramétrique, utilisé pour valider l'ajustement de la distribution bêta sur la série de données pour chaque pixel (Chakravarti 1967). Ce test a confirmé la validité de la loi bêta à 99.32% des séries avec un seuil de significativité de 99 %.

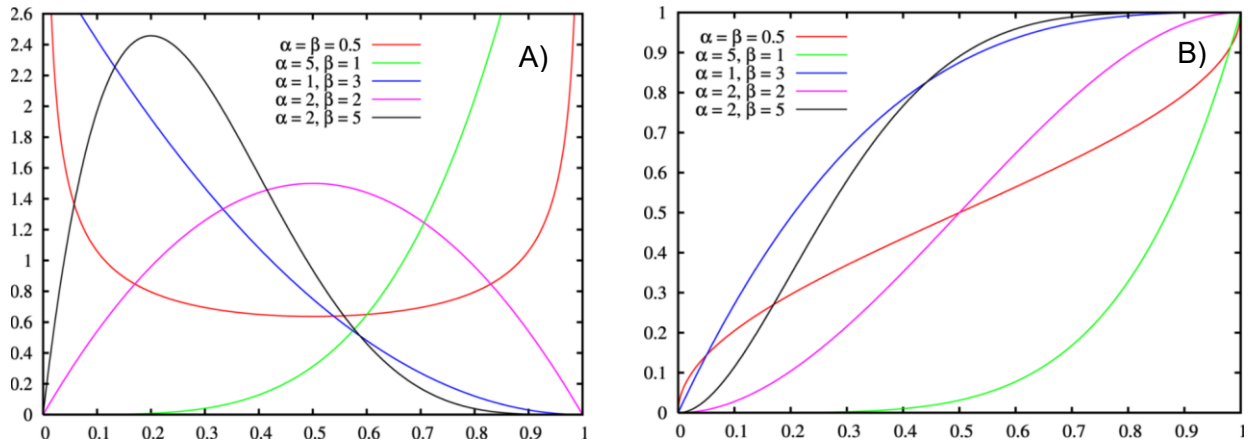


Figure 3.10 : La fonction de densité (A) et de répartition cumulée (B) de la fonction bêta

La fonction ICDF (inverse cumulative distribution function) est utilisée pour extraire la probabilité d'occurrence de l'eau pour un pixel donné, en fonction d'une période de retour donnée et à partir de la distribution de la répartition cumulée bêta. Cette dernière est créée en fonction des paramètres α et β pour chaque pixel. Donc, les résultats sont les cartes de probabilité d'occurrence de l'eau, estimées à chaque période de retour.

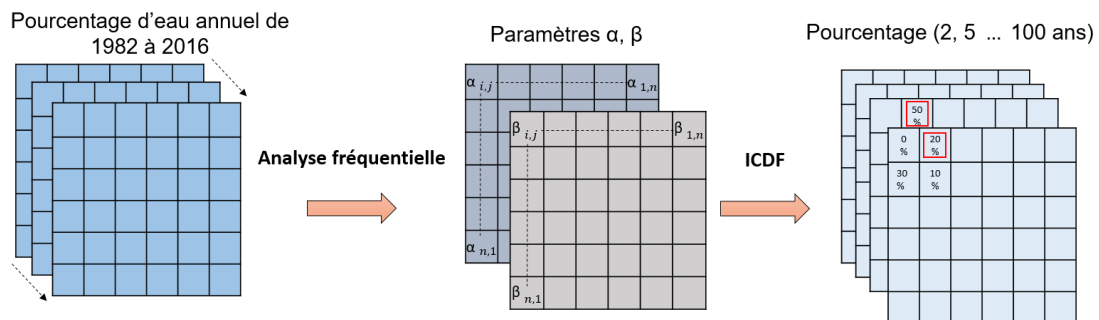


Figure 3.11 : Étapes de l'analyse fréquentielle : Étape 1) analyse fréquentielle pour calculer les paramètres α et β à partir des cartes maximum d'eau. Étape 2) extraire la probabilité d'occurrence de l'eau de chaque pixel à partir des paramètres α et β .

3.3.7 Désagrégation

La désagrégation est utilisée pour raffiner la résolution spatiale des cartes de la probabilité d'occurrence de 30 mètres au mètre (Figure 3.12), et ce pour l'ensemble des périodes de retour (2, 20 et 100 ans). Cette étape permet de distinguer avec plus de détails la bordure des cotes de crues. Pour ce faire, il a été nécessaire de passer par deux étapes essentielles : la production des données HAND à partir des données LiDAR et la délimitation des cotes de crues.

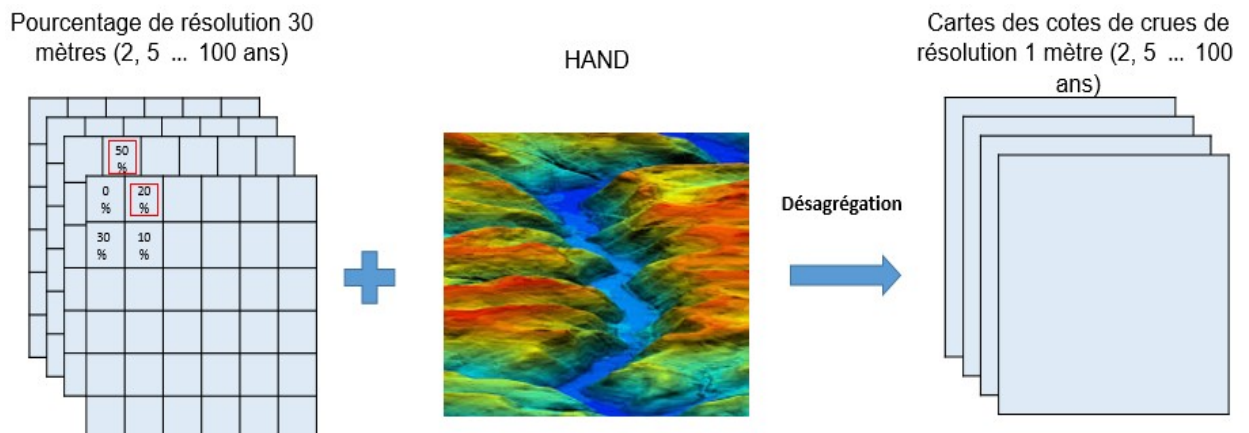


Figure 3.12 : Étape de désagrégation des cartes de probabilité d'appartenance de la classe d'eau avec les données d'élévation HAND

Les données du HAND ont été générées à partir du réseau hydrographique et du MNT (Figure 3.13-A) issues du LiDAR (Liu et al. 2016; A.D. Nobre et al. 2011). La distribution spatiale du HAND a par la suite permis de produire des niveaux d'altitude par rapport au niveau de la mer (Figure 3.13-B). L'avantage du HAND par rapport au MNT est que les pixels qui représentent la rivière prennent l'altitude de 0 m et les autres pixels qui représentent les différents reliefs sont calculés par rapport au niveau du réseau hydrographique. Le but d'utiliser la méthode HAND est d'améliorer la désagrégation (dont les étapes sont détaillées dans la section suivante) puisque les altitudes sont générées par rapport au niveau de la rivière, donc il est plus facile de délimiter les cotes de crues.

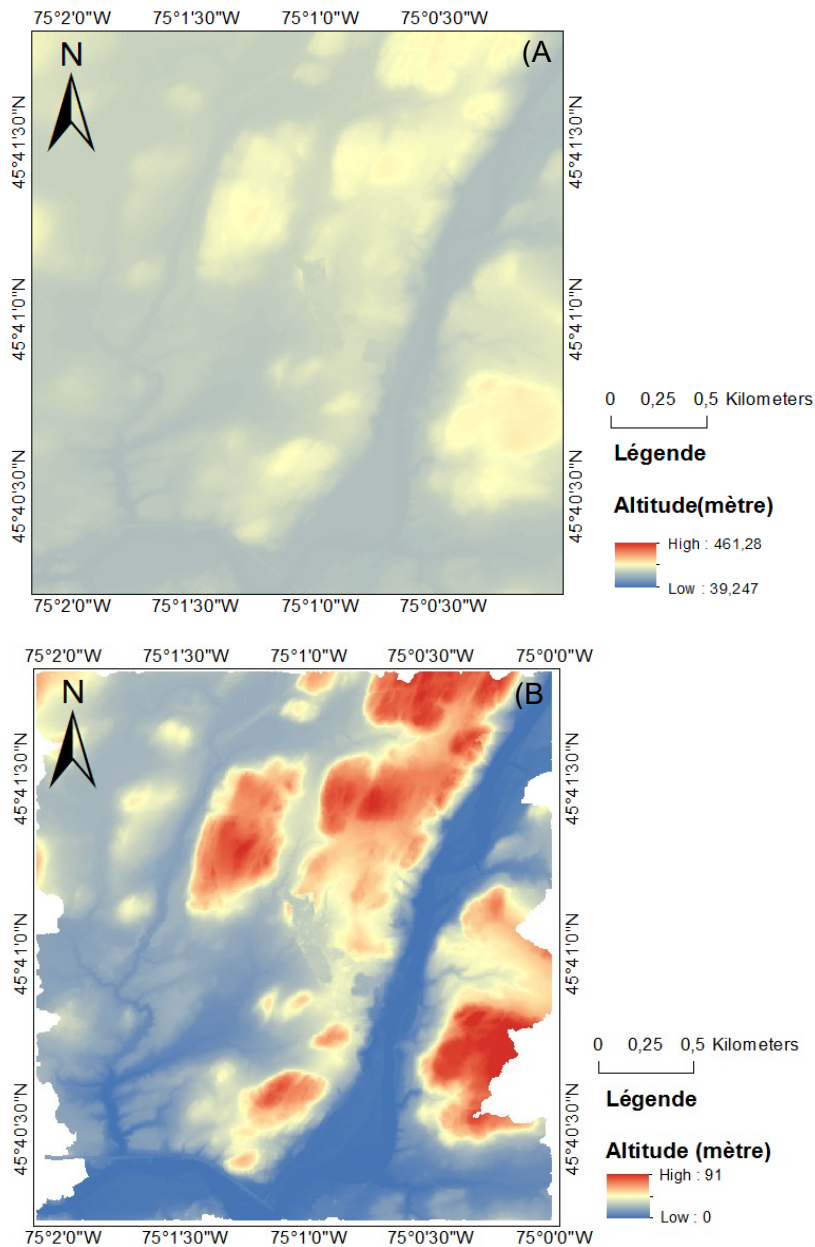


Figure 3.13 : Les altitudes MNT de la zone d'étude (A) et les altitudes HAND de la zone d'étude (B)

La désagrégation spatiale des données de Landsat est basée sur le principe physique de la gravitation terrestre. En effet, sous l'hypothèse que les basses altitudes des pixels du HAND, correspondant à un pixel mixte de Landsat (qui a une probabilité d'appartenance à la classe eau > à 0 % et < à 100 %), sont les plus humides, il a été possible de discriminer entre la classe eau et terre de ce pixel. Prenons l'exemple d'un pixel mixte à 30 m de résolution spatiale et une probabilité de 60 % d'appartenance à la classe eau. En d'autres termes, la surface de ce pixel

est immergée d'eau à 60 %. Basé sur le principe de la gravitation terrestre, la valeur maximal des 60 % des faibles altitudes des 900 pixels¹ du HAND est le seuil de discrimination.

Pour la présente étude, la limite de la cote des crues est considérée comme la ligne d'eau des altitudes les plus élevées du HAND des pixels dont la probabilité d'appartenance à la classe eau est supérieure à 50 %, et ce pour chacune des cartes d'occurrence produites (2, 20, 100 ans). En effet, tel qu'il a été décrit ci-haut, pour chaque pixel mixte, un seul seuil de discrimination basé sur les données du HAND a été identifié en fonction de sa probabilité d'appartenance à la classe eau. Ainsi, les seuils de discrimination pour les pixels où la probabilité d'appartenance à la classe eau est supérieure à 50 % ont été retenus et le 95e percentile de ces seuils a été utilisé pour la délimitation finale. Cet exercice a été appliqué aux trois cartes de probabilité d'occurrence (2, 20 et 100 ans) ce qui a mené à la désignation des trois lignes des cotes de crues pour les périodes de retour de 2, 20 et 100 ans.

L'évaluation de la précision des résultats des cotes de crues des deux méthodes a été effectuée par deux indices calculées à partir d'une matrice de confusion, soit la précision globale et le coefficient Kappa (Stehman 1996). L'indice de la précision global (ou le succès global) est le ratio des pixels bien classés par rapport au nombre total des pixels, il indique la précision globale de la classification. Alors que le coefficient Kappa indique la qualité de la classification, il donne l'information sur la classification des pixels par le hasard. Il est compris entre -1 et 1 ; Plus le coefficient Kappa est élevé, plus la qualité est bonne. Deux erreurs sont également calculés, soit l'erreur de commission et l'erreur d'omission: Le premier indique le nombre de pixels attribués par erreur à une classe et la deuxième erreur indique le nombre de pixels attribués par erreur d'une classe à une autre classe.

¹30 x 30 pixels du HAND correspondants à 1 pixel de Landsat.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Cartes composites du NDWI annuelles

Chaque image composite représente l'étendue maximale annuelle de l'eau dans la zone d'étude pour les périodes estivales et printanières (periode d'eau libre). La présence de la neige dans les images hivernales présentait un défi majeur, car il est difficile de différencier entre l'eau et la neige en se basant sur le NDWI, puisque ces deux éléments ont une valeur de NDWI élevée. Après élimination des images hivernales, ainsi que des images avec un problème dans le masque des nuages et l'ombre des nuages, le nombre total d'images utilisé au cours de ce projet était de 356 images. Le diagramme dans la figure 4.1 montre le nombre des images utilisées pour élaborer les images composites annuelles.

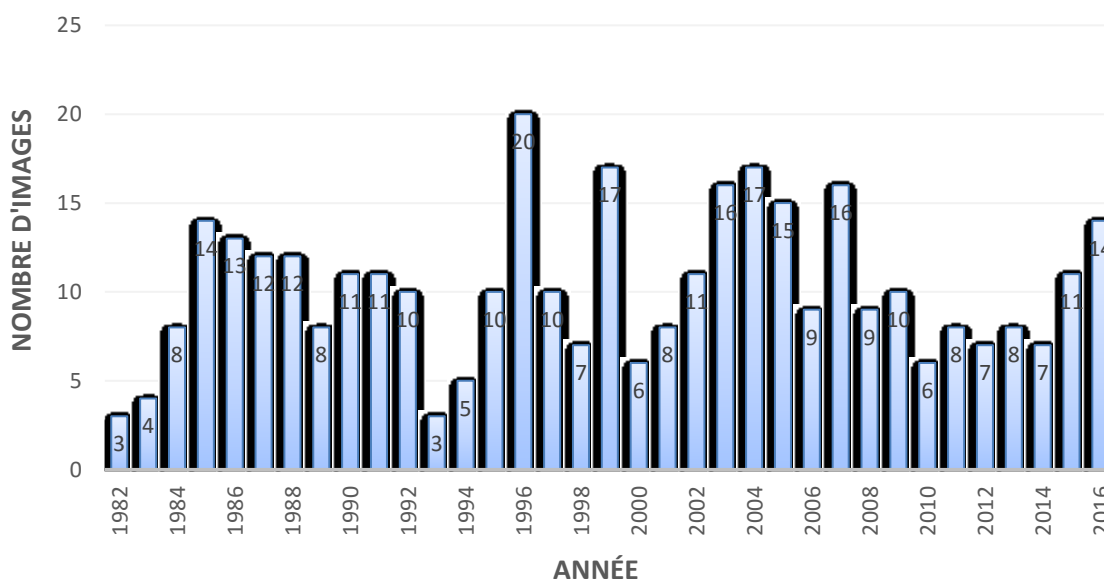


Figure 4.1 : Nombre d'images pour élaborer les images composites annuelles

Le nombre des images satellitaires historiques était variable d'une année à une autre (Figure 4.1). Pour les années 1982 et 1983, le nombre total fourni par le capteur Landsat-4 est faible, soit de 3 et 4 images, respectivement. En effet, le capteur Landsat-4 a été lancé en 16/07/1982. Pendant les 2 premières années, il a subi des séries de tests et de calibrations programmées pour améliorer la qualité des images. Dans cette série temporelle, deux autres années, soit 1993

et 1994, sont également marquées par un nombre faible d'images annuelles dont la cause cette fois-ci est la durée des hivers, qui étaient plus longs que la normale.

La figure 4.2, montre la variation spatio-temporelle du NDWI maximum annuel. Trois zones sont identifiées: zone d'eau permanente (gris pâle), zone du sol (gris foncé) et zone transitoire (dégradé de gris) qui sont spatialement variables d'une année à l'autre. Cette variabilité laisse supposée que les composites du NDWI annuelles enregistrent les empreintes des conditions climatiques, d'une année donnée, en termes de zones humides. Que ce soit sur l'exemple présenté à la Figure 4.2-A ou 4.2-B, les trois zones prémentionnées sont bien marquées, particulièrement le long de la rivière où les valeurs du NDWI varient en fonction de la distance des pixels par rapport à l'axe central du lit mineur de la rivière. Plus précisément, au niveau de la zone encadrée en rouge, la variation temporelle entre les deux années est plus prononcée; le nombre de pixels qui ont des valeurs élevées de NDWI (gris pâle) est supérieur en 1985 par rapport à l'année 1991. Ce tronçon de la rivière apparaît plus large en 1985 qu'en 1991, ce qui conduit à la conclusion que cette région a été inondée au cours de l'année 1985.

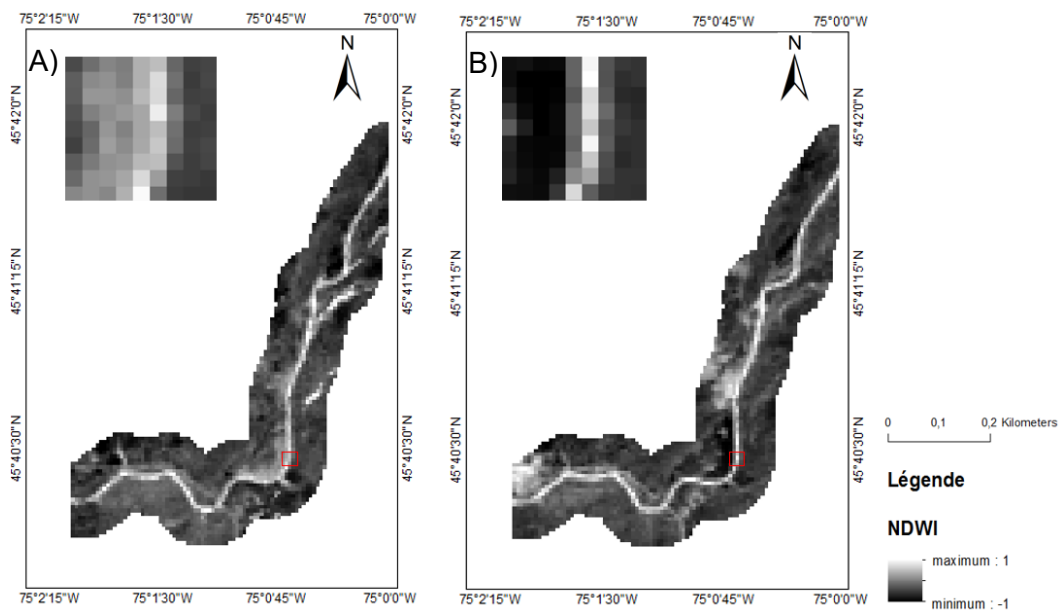


Figure 4.2 : Cartes composites des années : A) 1985 et B) 1991, avec leur zoom sur la région de la Petit Nation (cadre rouge)

4.2 Cartes de probabilité d'appartenance à la classe eau

La classification Fuzzy-c means a permis de calculer la probabilité d'appartenance à la classe eau en se basant sur les valeurs du NDWI des images composites annuelles. Dans les deux images de probabilité présentées à la figure 4.3 et qui représentent les résultats de la classification pour les années 1985 et 1991, la couleur des pixels varie selon la valeur du compte numérique : soit totalement bleu s'il est égal à 1 (100% eau) et il est totalement blanc s'il est égal à 0 (100% terre). De la figure 4.3, il est clair que la zone d'étude (cadre rouge) a connu des inondations au cours de l'année 1985 ; La rivière est plus étendue, notamment vers l'ouest, par comparaison à l'année 1991.

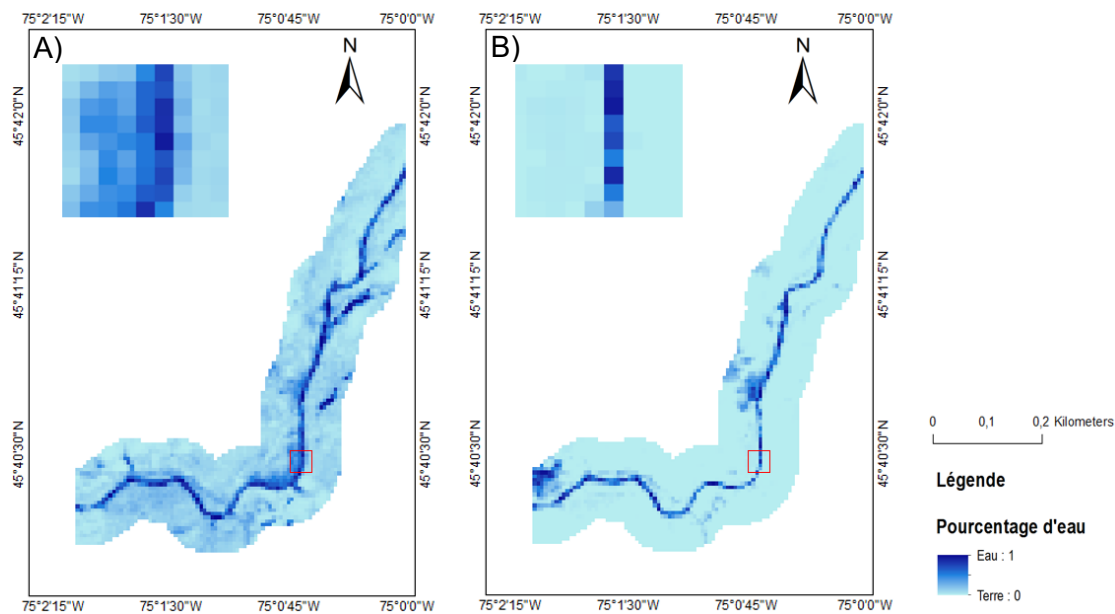
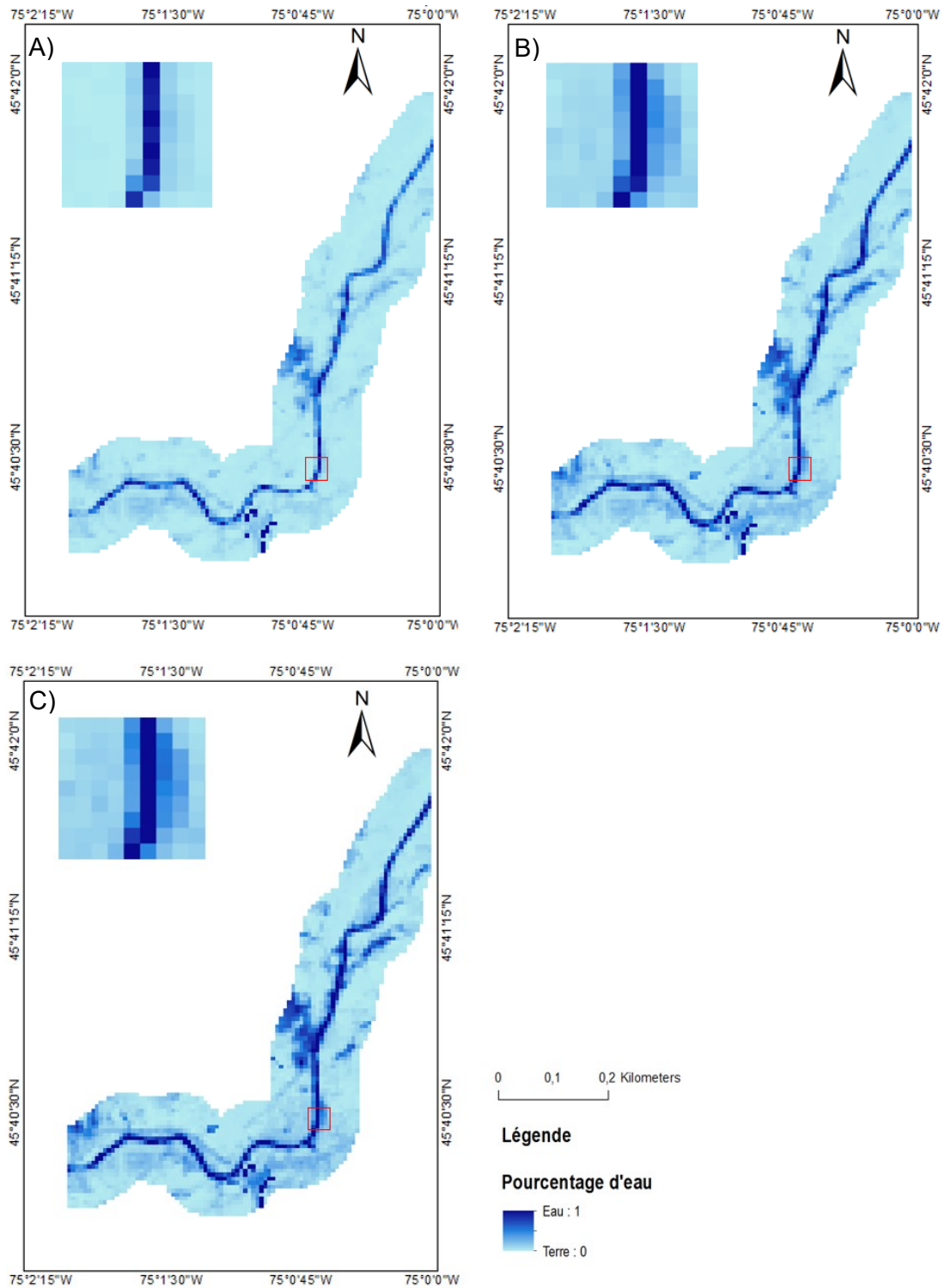


Figure 4.3 : Cartes de probabilité d'appartenance à la classe d'eau en 1985 (A) et 1991 (B), élaborées par une classification Fuzzy-c means

4.3 Cartes de probabilité d'occurrence de l'eau

L'analyse fréquentielle a permis d'élaborer les cartes de probabilité d'occurrence de l'eau pour les périodes de retour ciblées. Sur la Figure 4.4 sont présentés les résultats de l'analyse fréquentielle ainsi que les cotes de crues pour les périodes de retour de 2, 20 et 100 ans. Pour la période de retour de 2 ans (Figure 4.4-A), il est à préciser que la rivière est presque de même largeur (30-35 mètres) tout au long de la rivière. Dans la carte de la période de retour de 20 ans (Figure 4.4-B), les limites de la rivière sont plus larges que celles sur la carte de 2 ans. On remarque une augmentation dans la probabilité d'occurrence de l'eau surtout pour les pixels qui représentent les zones inondables (plus faibles altitudes). Cependant, pour la période de retour de 100 ans (Figure 4.4-C), les valeurs des pixels ont faiblement augmentées par rapport à la période de retour de 20 ans. Plus précisément dans la zone encadrée, on remarque que la probabilité d'appartenance à la classe eau a augmenté entre les périodes de retour de 2 ans et 20 ans. Par contre, on note une légère augmentation de probabilité entre les périodes de retour de 20 et 100 ans. Ceci peut-être expliquer par le fait que les cotes de crues de 2 et 20 ans sont éloignées naturellement par une distance considérable par rapport à l'écart spatial entre les cotes de crues de 20 et 100 ans.



**Figure 4.4 : Cartes de probabilité d'occurrence de l'eau estimées pour les périodes de retour de :
A) 2 ans, B) 20 and et C) 100 ans**

4.4 Désagrégation spatiale et production des cartes des cotes de crues

À partir des percentiles calculés, la délimitation (ou délinéation) des zones des crues pour une période de retour donnée basée sur les données HAND à 1 mètre de résolution spatiale a été possible. Les 95e percentiles des cotes de crues de 2, 20 et 100 ans, ont été respectivement 0.67, 2.62 et 3.27 mètres de HAND. La Figure 4.5 présente les résultats des cotes de crues délinéées par la présente méthode et par un modèle hydraulique élaborée par le gouvernement du Québec.

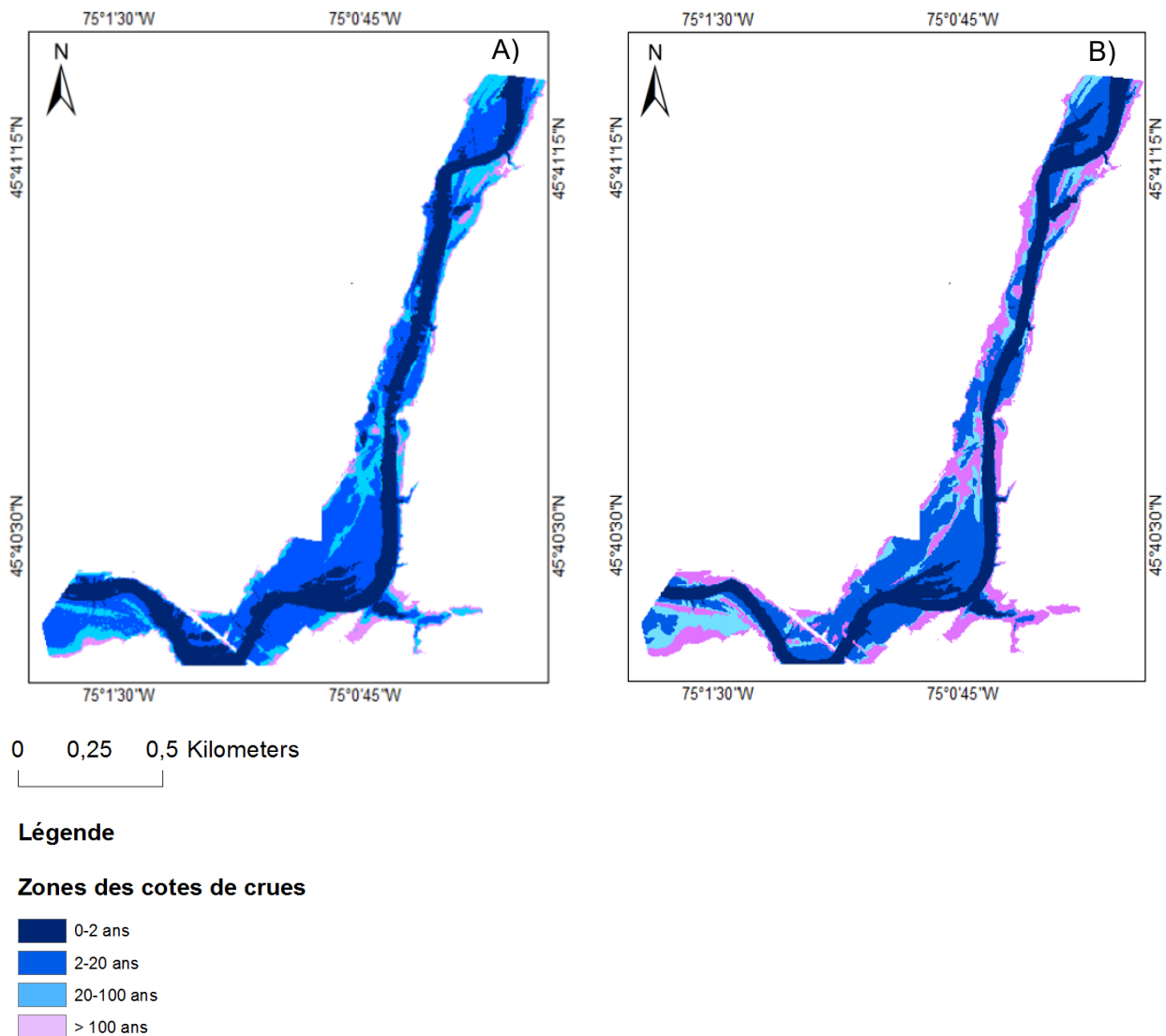


Figure 4.5 : Les cartes des cotes de crues élaborées par : A) la présente méthode proposée et B) le gouvernement du Québec à partir de la méthode hydraulique

D'après la Figure 4.5, on remarque une ressemblance visuelle entre les deux cartes pour la période de retour de 0-2 ans. La zone est continue le long de la rivière. En effet, cette dernière délimite l'eau permanente (lit mineur) et la zone d'inondations de fortes occurrences. L'erreur d'omission pour cette classe déduite par la matrice de confusion (Tableau 4.1) égale à 16 % et l'erreur de commission égale à 28 %. La zone délimitée par la période de retour de 2-20 ans (de couleur bleu marin) a une surface importante par rapport aux autres classes. Elle possède un taux d'erreur élevé par rapport à la classe de la période de retour de 0-2 ans, soit 24 % comme erreur d'omission et 35 % comme erreur de commission. Au niveau de la zone pour la période de retour de 20-100 ans, qui représente une surface faible, la classification a un taux d'erreur élevé, soit 67 % taux d'omission et 75 % taux de commission. De même, la zone de la période de retour supérieure à 100 ans a un taux d'erreurs d'omissions élevé, égale à 67 % et une erreur de commission faible égale à 2 %.

Tableau 4.1 : La matrice de confusion de la délimitation des cotes de crues de la méthode proposée par rapport aux cotes de crues de référence

		Estimée						
		[0-2]	]2-20]	]20-100]	>100	Total	Erreur d'omission	Taux de succès
Observée	[0-2]	175410	34154	169	0	209733	16	84
	]2-20]	52561	209990	14515	689	277755	24	76
	]20-100]	8977	54566	31602	625	95770	67	33
	>100	8005	22639	80152	54781	165577	67	33
	Total	244953	321349	126438	56095	748835	-	-
	Erreur de commission	28	35	75	2	-	-	-
	Taux de succès	72	65	25	98	-	-	-
	Succès global (%)	-	-	-	-	-	-	63
	Indice Kappa (%)	-	-	-	-	-	-	30

Des erreurs d'omissions et de commissions, il est clair que la confusion est inférieure dans les classes 0-2 et 2-20 ans, par rapport aux classes 20-100 et >100 ans. En effet, il est difficile de classer les cotes de crues de 20 et 100 ans, puisque les surfaces délimitées par ces dernières sont réduites. C'est-à-dire, les cotes de crues de 20 ans et 100 ans sont naturellement très proches. De plus, on remarque qu'il y a un enchevêtrement, entre les cotes de crues délimitées par le gouvernement dans plusieurs endroits. Dans cette optique, la précision globale de 60 % et l'indice Kappa de 30 % sont expliqués.

En termes de surface, la délimitation de la zone de 0-2 ans surestime une surface importante égale à 52 km² et sous-estime une surface de 34 km² de la zone adjacente. Également, la délimitation de la zone 2-20 ans surestime 54 km² et sous-estime 52 km², de la zone adjacente de 20-100 ans. De même, la délimitation de la zone de 20-100 ans surestime une surface de 80 km² de la zone adjacente (100->100 ans), et sous-estime 54 km² de la zone adjacente délimitée de 20-100 ans. La zone 100->100 ans sous-estime une surface de 102 km² des zones adjacentes (20-100 ans et 100->100 ans). Il est à préciser que les statistiques sont basés sur les erreurs maximales (erreurs d'omissions et erreurs de commission).

Cette faible performance peut-être due au fait que les cotes de crues délimitées par le gouvernement, issues également d'une modélisation, viennent également avec des erreurs et des incertitudes. La comparaison de deux produits de modélisation à fort probablement mener à la faible performance de la méthode proposée, qui a malgré tout démontrée le potentiel de la télédétection pour les faibles occurrences (0-2 et 2-20 ans). En effet, le taux du succès des cotes de crues de 2 ans et 20 ans est successivement 84% et 76%. Ces performances relativement moyennes permettent de délimiter les cotes de crues de 2 ans et de 20 ans, qui sont les plus utilisées pour les municipalités et les gouvernements afin de protéger les habitants des rives de la rivière.

Par rapport à d'autres études de délimitation des cotes de crues comme (Yu and Lane 2006; Antonio Donato Nobre et al. 2016; Tan et al. 2017), où les erreurs variaient de 71,3 % à 92 %. Mais il faut garder à l'esprit que ces méthodes sont basées sur des débits journaliers dans les zones à risques qui permettent de mesurer les débits dans les périodes de crues. De plus, les modèles hydrauliques sont calibrés à chaque zone, par conséquent, le calcul tient en compte des paramètres spécifiques du terrain. Par contre, la méthode proposée est basée seulement sur les images satellitaires.

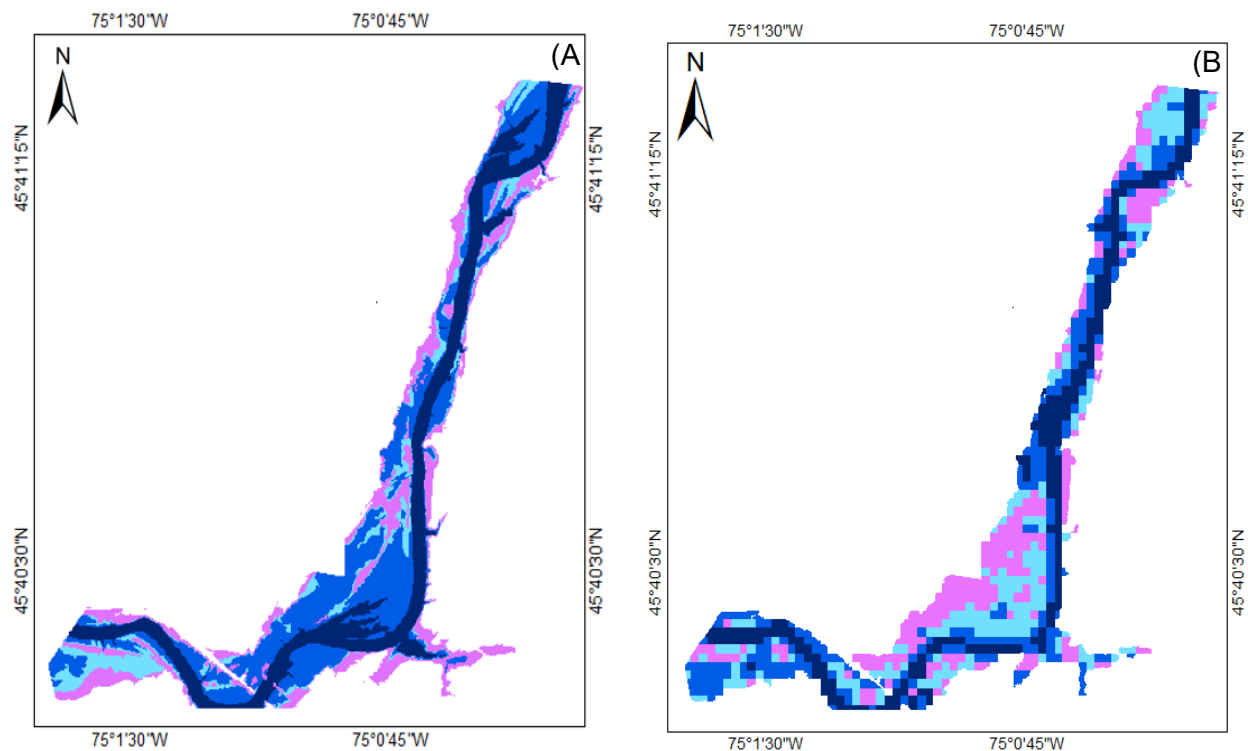
Le nombre total d'images utilisées s'élève à 356, sur 1729 images téléchargées. En effet, 80 % des images ne sont pas utilisées en raison du couvert de la neige et des nuages. Afin d'analyser leur impact sur la délimitation des zones inondables, il a été question de comparer les dates d'acquisition des images Landsat avec les dates des maximums de crues. De même, dans le Tableau 4.2, on présente les dates d'acquisition proches des dates du débit maximum annuel. Excepté pour l'année 1985, une différence de 1 à 10 jours est remarquée entre les dates d'acquisitions et les débits maximaux annuels. Par conséquent, le faible taux d'images concomitant aux débits maximaux annuels a certainement un impact sur la performance de l'approche proposée mais au moins il y avait toujours une image durant la période de la crue printanière

(mai). Toutefois, les images couvrant les périodes des embâcles hivernales et les crues du début de la fonte printanière (mars-avril) n'ont pas été analysées.

Tableau 4.2 : Date d'acquisition des images Landsat et dates de prélèvement des mesures des débits maximums annuels des stations hydrométriques (avec le numéro fédéral de la 02LD005)

Date d'acquisition des images Landsat	Date de prélèvement de la mesure	Débit maximum annuel de la station hydrométrique (m ³ /s)
1985/05/01	1985/05/01	115
1992/05/29	1992/05/05	95.31
1996/05/08	1996/05/03	122.2
1997/05/11	1997/05/08	115.9
1999/05/01	1999/04/25	78.51
2004/05/14	2004/05/11	62.13
2005/05/08	2005/05/02	90.58
2011/05/09	2011/05/05	84.49

Afin de comparer les performances de l'approche avant et après la désagrégation, une carte des cotes de crue de résolution spatiale de 30 mètres a été élaborée. Cette analyse comparative est effectuée par une matrice de confusion. Les pixels dont la probabilité d'appartenance de la classe « eau » est supérieure à 50 % ont été identifiés afin de délimiter les zones de crues des cartes d'occurrence produites (2, 20 et 100 ans).



0 0,25 0,5 Kilometers

Légende

Zones des cotes de crues



Figure 4.6 : Les cartes des cotes de crues élaborées par : A) le gouvernement du Québec à partir de la méthode hydraulique B) la présente méthode proposée avant la désagrégation

D'après la Figure 4.6-B on observe que la classe 0-2 ans perd sa continuité tout le long de la rivière, par rapport à la classe délimitée par la méthode hydraulique (figure 4.6-A). Cette dernière délimite la zone d'eau permanente qui est toujours présente, comme montrée dans la carte élaborée après désagrégation (Figure 4.5). L'erreur d'omission pour cette classe est de 38 % et l'erreur de commission de 25 % (pour cette même classe le taux d'erreur omission/commission de 16% et 28 % après désagrégation). La zone délimitée par la période de retour de 2-20 ans a une surface moins importante par rapport aux autres classes. Ce qui se traduit par un taux d'erreur élevé par rapport à la classe de la période de retour de 0-2 ans, soit 76 % comme erreur d'omission et 35 % comme erreur de commission (pour cette même classe le taux d'erreur

omission/commission est, 24% et 35 % après désagrégation). Au niveau de la zone de la période de retour de 20-100 ans qui a une surface plus importante que celle délimitée par le gouvernement, la classification a un taux d'erreur élevé, soit 80 % taux d'omission et 89 % taux de commission (pour cette même classe le taux d'erreur omission/commission est, 67% et 75 % après désagrégation). De même, la zone de la période de retour supérieure à 100 ans a un taux d'erreur d'omission élevé, soit 65 % et une erreur de commission de 72 % (pour cette même classe le taux d'erreur omission/commission est, 67% et 2 % après désagrégation). Par conséquent, la précision globale de 36 % et l'indice Kappa de 25 % sont faibles.

Tableau 4.3 : La matrice de confusion de la délimitation des cotes de crues de la méthode proposée par rapport aux cotes de crues de référence

		Estimée						
		[0-2]	]2-20]	]20-100]	]100->100]	Tot	Erreur de omission	Taux de succès
Observée	[0-2]	130199	46967	23402	8519	209087	38	62
	]2-20]	26892	66381	91748	89247	274268	76	24
	]20-100]	9031	34039	18442	31809	93321	80	20
	]100->100]	8530	46409	36211	49406	140556	65	35
	Tot	174652	193796	169803	178981	717232	-	-
	Erreur d'commission	25	65	89	72	-	-	-
	Taux de succès	74	34	10	27	-	-	-
	Succès global (%)	-	-	-	-	-	-	36
	Indice Kappa(%)	-	-	-	-	-	-	25

À partir des deux matrices de confusion (tableau 4.1 et tableau 4.3) de la carte d'occurrence avant désagrégation et après désagrégation, une amélioration dans la précision de la délimitation des cotes de crues due à la désagrégation spatiale est observée. En fait, les erreurs d'omission et les erreurs de commission de toutes les classes sont moins élevées. Également, la précision globale et l'indice Kappa se sont améliorés. La distance entre les lignes des cotes de crues dans plusieurs zones est faible, surtout les enchevêtrements entre les lignes de 20 et 100 ans, qui sont généralement moins de 30 mètres. C'est pour cette raison qu'un pixel de résolution spatiale de 30 mètres ne peut pas délimiter avec précision les zones délimitées par les cotes de crues.

Concernant la méthodologie proposée, plusieurs sources d'erreurs et d'incertitudes peuvent influencer la délimitation des cotes de crues qui sont liées soit aux données brutes et/ou aux traitements d'images. En premier lieu, on a démontré que le nombre d'images faible par année a un grand impact, puisque les images ne couvrent pas les maximums des crues. En addition, pour

pouvoir exploiter les images Landsat, ces dernières passent par plusieurs calibrations et corrections automatiques. Ces corrections sont basées sur des interpolations et des corrélations, qui arrivent avec un intervalle d'erreur comme la correction géométrique qui est basée sur un modèle numérique du terrain. De plus, la classification fuzzy-c means est une classification non supervisée, basée sur l'estimation des centres de classes et d'appartenance des pixels à chaque classe. Malgré que l'algorithme soit contrôlé avec un nombre d'itérations maximal et un seuil d'erreur minimal, la précision de la classification des pixels reste sensible à un taux d'erreur minimal. De plus, dans l'étape de l'analyse fréquentielle, la stationnarité, l'indépendance et l'homogénéité ont été vérifiées par des tests statistiques, ainsi que le choix de la distribution statistique. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que l'analyse fréquentielle est un outil statistique, élaboré pour estimer une probabilité possible. Cette probabilité est affectée par une incertitude liée à la variabilité du changement climatique. Finalement, l'étape de désagrégation est basée sur des données d'élévation du HAND, élaborées à partir des données topographiques MNT et du réseau hydrographique. En effet, l'écart type des données du MNT est de 0.15 cm à 0.3 cm (Mercer 2004). De plus, le réseau hydrographique possède des anomalies dans certaines portions de la rivière, ce qui mène à des incertitudes dans les résultats de HAND.

5 CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude était la délimitation (ou délimitation) des cotes de crues d'une partie de la rivière Petite Nation à l'aide de l'historique (de 1982 à 2016) d'imageries satellitaires de la série des capteurs Landsat (TM, ETM+ et OLI). Pour aboutir aux termes de cet objectif, quatre objectifs spécifiques ont été fixés : 1) élaborer des cartes composites du NDWI annuelles, 2) estimer la probabilité d'appartenance à la classe eau des cartes composites annuelles, 3) élaborer les cartes de probabilité d'occurrence de l'eau pour chaque période de retour et 4) désagréger les cartes de crues à 1 mètre de résolution spatiale.

Le premier sous-objectif consistait à élaborer les cartes composites annuelles, pour représenter l'étendue maximale de l'eau pour chaque année. Afin de répondre à cet objectif, une revue de littérature a été faite pour connaître les différents indices utilisés pour la détection de l'eau. La revue de littérature inclut aussi les méthodes de délimitation des zones inondées par rapport aux images produites par Google Engine. Les cartes élaborées montrent que la méthode adoptée a permis de présenter l'étendue maximale de la rivière de largeur moyenne de 25 à 40 mètres pour chaque année, à partir des images Landsat d'une résolution de 30 mètres.

Le deuxième sous-objectif visait à calculer les probabilité d'appartenance à la classe eau des cartes composites. Pour ce faire, une classification fuzzy-c means a été appliquée sur l'ensemble des images composites. Cette classification a permis d'avoir une information uniforme, et ce pour l'ensemble des images composites annuelles, par rapport à la présence ou l'absence de façon permanente ou temporaire de la classe eau. Les cartes produites représentaient clairement l'étendue de la rivière Petite Nation, avec une continuité permanente de la classe eau même pour les sections restreintes.

Le troisième sous-objectif consistait à estimer la probabilité d'occurrence de l'eau pour les périodes de retour de référence soit 2, 20 et 100 ans. Pour réaliser cet objectif, une analyse fréquentielle a été appliquée après la vérification des conditions : d'homogénéité, d'indépendance, et de stationnarité ainsi que l'application du test statistique Kolmogorov-Smirnov, afin de valider le choix de la loi statistique bêta, par rapport aux données historiques. Dans les trois cartes de 2, 20 et 100 ans, la probabilité d'occurrence de l'eau augmentait de façon proportionnelle avec les périodes de retour. Puisque, l'étendue de l'eau est plus grande, si la période de retour est devenue plus élevée.

Le quatrième sous-objectif vise à désagréger la résolution spatiale, via des données HAND, du 30 au 1 mètre des cartes de la probabilité d'occurrence de l'eau. Les cotes de crues générées

par la méthode proposée ont été comparées avec celles délimitées par le gouvernement du Québec, suite à une étude hydraulique. Les résultats ont démontré un indice *Kappa* faible de 0.30 (Viera and Garrett 2005), avec une précision globale moyenne de 60%, qui peut-être liée probablement au nombre d'incertitudes élevé des deux méthodes sur lesquelles reposent la génération des cartes de cotes de crues produites (du gouvernement du Québec et de l'approche proposée) mais aussi du faible nombre d'images Landsat utilisées et de la résolution spatiale grossière de 30 m.

En conclusion dans le présent projet, les quatre sous-objectifs ont été atteints. Par conséquent, l'objectif principal qui sert à étudier le potentiel de l'imagerie satellitaire à délimiter les cotes de crues a été abouti. Les principales conclusions qui ont pu être tirées de cette recherche sont les suivantes:

- La solution technologique qui utilise l'historique de l'imagerie de résolution moyenne est novatrice. Le potentiel de cette technologie va mener à des travaux de plus en plus nombreux.
- La présente méthode a démontré qu'elle est possible de bien présenter les zones inondées à partir des images composites du NDWI annuelles. De même, suite à une analyse fréquentielle, les cartes de probabilité d'occurrence de l'eau représentaient clairement les zones inondables.
- La méthode de désagrégation proposée a permis d'améliorer la résolution spatiale des cartes ainsi que la précision des cotes de crues avec un niveau de détail au mètre.

Ce projet de recherche offre plusieurs résultats qui pourraient être le point de départ à d'autres projets futurs. C'est pourquoi dans ce paragraphe, on propose quelques recommandations qui pourront améliorer la méthodologie, afin d'augmenter la précision des cotes de crues. En premier lieu, le nombre des images Landsat utilisées pour générer les images composites variait d'une année à une autre. Ces images composites représentent la réalité du terrain. Ainsi, plusieurs événements d'inondation peuvent être non détectés. La résolution de ce point, dans l'optique d'enregistrer un maximum d'évènements d'inondations passés, peut résider dans les points suivants :

- L'amélioration du masque du nuage et de l'ombre de nuage pourrait être une solution afin d'exploiter un plus grand nombre d'images.
- Le développement d'une méthode menant à l'exploitation des images hivernales pourrait apporter une information supplémentaire quant aux inondations, particulièrement en cas d'embâcles.

- La combinaison de plusieurs sources de données afin d'augmenter le nombre d'images, comme les images optiques de Sentinel-2A et 2B avec un cycle de 6 ou 12 jours. Également, des images Radar qui pourraient être utilisées, puisque ces dernières ne sont pas affectées par les nuages.

En deuxième lieu, au niveau de la méthodologie, on propose : d'améliorer la classification, afin de bien estimer la probabilité d'eau pour les pixels mixtes, selon la valeur de NDWI, de calibrer et de valider la méthode avec des cotes de crues de d'autres régions. De plus, à partir des cartes composites et des cartes de la classification, on pourrait avoir aussi les limites et l'occurrence, mensuelles et annuelles des zones inondées.

En conclusion, malgré son inconvénient lié au domaine optique, la méthode proposée dans ce travail s'est montrée performante pour la délimitation des zones inondées. Cette méthode est unique au niveau de la délimitation des zones inondables d'une rivière de largeur de 30 mètres, avec des images satellitaires d'une résolution spatiale égale à 30 mètres.

BIBLIOGRAPHIE

- Alphen, Jos van, and Ron Passchier. 2007. "Atlas of Flood Maps Examples from 19 European Countries USA and Japan."
- Anees, Mohd Talha, K Abdullah, M N M Nawawi, Nik Norulaini Nik Ab Rahman, Abd Rahni Mt Piah, Nor Azazi Zakaria, M I Syakir, and A K Mohd. Omar. 2016. "Numerical Modeling Techniques for Flood Analysis." *Journal of African Earth Sciences* 124: 478–86.
- Arnaud, Patrick, Jacques Lavabre, Catherine Fouchier, Stéphanie Diss, and Pierre Javelle. 2011. "Sensitivity of Hydrological Models to Uncertainty in Rainfall Input." *Hydrological Sciences Journal* 56 (3): 397–410.
- Baldassarre, Giuliano Di. 2012. *Floods in a Changing Climate*. Edited by Cambridge university. Cambridge.
- Baldassarre, Giuliano, Alberto Montanari, Harry Lins, Demetris Koutsoyiannis, Luigia Brandimarte, and Günter Blöschl. 2010. "Flood Fatalities in Africa: From Diagnosis to Mitigation--Supplementary Document." *Geophysical Research Letters* 37: 1–4.
- Beliakov, Gleb, and Matthew King. 2006. "Density Based Fuzzy c-Means Clustering of Non-Convex Patterns." *European Journal of Operational Research* 173 (3): 717–28.
- Benkhaled, A., H. Higgins, F. Chebana, and A. Necir. 2014. "Frequency Analysis of Annual Maximum Suspended Sediment Concentrations in Abiod Wadi, Biskra (Algeria)." *Hydrological Processes* 28 (12): 3841–54.
- Berri, Ofer, and Rebecca L. Phillips. 2007. "Tracking Palustrine Water Seasonal and Annual Variability in Agricultural Wetland Landscapes Using Landsat from 1997 to 2005." *Global Change Biology*, January. Blackwell Publishing Ltd, 205–2015.
- Bezdek, James C. 1981. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Boston: Springer US.
- Brivio, P A, R Colombo, M Maggi, and R Tomasoni. 2002. "Integration of Remote Sensing Data and GIS for Accurate Mapping of Flooded Areas." *Int. J. Remote Sensing* 23 (3): 429–41. <https://pdfs.semanticscholar.org/771c/1f8d027afacb544b6cb3c02fbd9192e9e01c.pdf>.
- Burrell, B C, M Huokuna, S Beltaos, N Kovachis, B Turcotte, M Jasek, and CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment. 2015. "Flood Hazard and Risk Delineation of Ice-Related Floods: Present Status and Outlook."

- Centre d'expertise hydrique du Québec. 2008. "Détermination Des Cotes de Crues Correspondant À La Zone de Grand Courant et À La Zone de Faible Courant."
- Chakravarti, I. 1967. *Handbook of Methods of Applied Statistics*. New York.
- Chander, Gyanesh, Brian L. Markham, and Dennis L. Helder. 2009. "Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors." *Remote Sensing of Environment* 113 (5). Elsevier: 893–903.
- Chavez, Pat S. 1988. "An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data." *Remote Sensing of Environment* 24 (3): 459–79.
- Chen, Lu, and Vijay Singh. 2017. "Generalized Beta Distribution of the Second Kind for Flood Frequency Analysis." *Entropy* 19 (6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 254.
- Chiu, Wen-Ya, and Isabelle Couloigner. 2006. "Modified Fuzzy c-Means Classification Technique for Mapping Vague Wetlands Using Landsat ETM+ Imagery." *Hydrological Processes* 20 (17): 3623–34.
- Choi, Jaewon, Joong-sun Won, and Saro Lee. 2008. "ATC : An Image-Based Atmospheric Correction Software in MATLAB and SML" 24 (5): 417–25.
- Chokmani, K., and T. B. M. J. Ouarda. 2004. "Physiographical Space-Based Kriging for Regional Flood Frequency Estimation at Ungauged Sites." *Water Resources Research* 40 (12).
- Chow, Candace, André Twele, and Sandro Martinis. 2016. "An Assessment of the Height Above Nearest Drainage Terrain Descriptor for the Thematic Enhancement of Automatic SAR-Based Flood Monitoring Services," 11.
- Cœur, Denis, Michel Lang, and André Paquier. 2002. "L'historien, L'hydraulicien et L'hydrologue et La Connaissance Des Inondations." *La Houille Blanche*, no. 4–5: 61–66.
- Cole, George M. 1997. *Water Boundaries*. Wiley.
- Colloque régional sur la sécurité civil de. 2010. "Inondés Par La Rivière Petit-Nation," 42.
- Direction Départementale des Territoire et de la Mer. 2012. "Note Sur La Détermination de L'aléa de Référence."
- [http://www.nord.gouv.fr/content/download/12207/73454/file/Introduction et partie 1 - méthode de détermination de l'aléa de référence \(phase 3 de l'étude\).pdf](http://www.nord.gouv.fr/content/download/12207/73454/file/Introduction%20et%20partie%201%20-%20méthode%20de%20détermination%20de%20l'aléa%20de%20référence%20(phase%203%20de%20l'étude).pdf).

- Dirkson, Arlan. 2017. "Initializing Sea Ice Thickness and Quantifying Uncertainty in Seasonal Forecasts of Arctic Sea Ice," 133.
- European Parliament, and Council of the European Union. 2007. "The European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks." Official Journal of the European Union.
- Falls, Lee W. 1974. "The Beta Distribution: A Statistical Model for World Cloud Cover." *Journal of Geophysical Research* 79 (9). Wiley-Blackwell: 1261–64.
- Fan, Jianchao, Min Han, and Jun Wang. 2009. "Single Point Iterative Weighted Fuzzy C-Means Clustering Algorithm for Remote Sensing Image Segmentation." *Pattern Recognition* 42 (11): 2527–40.
- Feyisa, Gudina L., Henrik Meilby, Rasmus Fensholt, and Simon R. Proud. 2014. "Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery." *Remote Sensing of Environment* 140 (January). Elsevier: 23–35.
- Gao, Bo-Cai. 1996. "NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space." *Science Inc* 58: 257–66.
- Gignac, Charles, Monique Bernier, and Karem Chokmani. 2018. "IcePAC-a Probabilistic Tool to Study Sea Ice Spatiotemporal Dynamic: Application to the Hudson Bay Area, Northeastern Canada," 23.
- Giustarini, Laura, Marco Chini, Renaud Hostache, Florian Pappenberger, and Patrick Matgen. 2015. "Flood Hazard Mapping Combining Hydrodynamic Modeling and Multi Annual Remote Sensing Data." *Remote Sensing* 7 (10): 14200–226.
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, and Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone," 10.
- Götzinger, Jens, and András Bárdossy. 2008. "Generic Error Model for Calibration and Uncertainty Estimation of Hydrological Models." *Water Resources Research* 44 (12).
- Handmer, John W, and Dennis J Parker. 1992. "Hazard Management in Britain: Another Disastrous Decade." *The Royal Geographical Society, The Institute of British Geographers*, 24: 113–22.
- Henderson-Sellers, A. 1978. "Surface Type and Its Effect upon Cloud Cover: A Climatological Investigation." *Journal of Geophysical Research* 83. Wiley-Blackwell: 103–11.

- Horritt, M.S. 2006. "A Methodology for the Validation of Uncertain Flood Inundation Models." *Journal of Hydrology* 326 (1–4): 153–65.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169405005615>.
- Huang, Chang, Yun Chen, and Jianping Wu. 2013. "Mapping Spatio-Temporal Flood Inundation Dynamics at Large River Basin Scale Using Time-Series Flow Data and MODIS Imagery." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26: 350–62.
- Huete, A, K Didan, T Miura, E P Rodriguez, X Gao, and L G Ferreira. 2002. "Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices," 195–213.
- Hunt, E Raymond, and Barrett N Rock. 1989. "Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near-and Middle-Infrared Reflectances" 30: 43–54.
- Jonkman, S N, and I Kelman. 2005. "An Analysis of the Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths." *Disasters* 29 (1): 75–95.
- Justel, Ana, Daniel Peña, and Rubén Zamar. 1997. "A Multivariate Kolmogorov-Smirnov Test of Goodness of Fit." *Statistics & Probability Letters* 35 (3): 251–59.
- Kendall, Maurice G. (Maurice George). 1975. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin.
<http://www.worldcat.org/title/rank-correlation-methods/oclc/917223584?referer=di&ht=edition>.
- Kesler, Christian Parker. 2017. "HAND Flood Mapping and National Water Model Access through Tethys Platform."
- Kunkel, Kenneth E., Roger A. Pielke, and Stanley A. Changnon. 1999. "Temporal Fluctuations in Weather and Climate Extremes That Cause Economic and Human Health Impacts: A Review." *Bulletin of the American Meteorological Society* 80 (6): 1077–98.
- Kwiatkowski, Denis, Peter C.B. Phillips, Peter Schmidt, and Yongcheol Shin. 1992. "Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit Root: How Sure Are We That Economic Time Series Have a Unit Root?" *Journal of Econometrics* 54 (1–3): 159–78.
- Laforce, S, M C Simard, R Leconte, and F Brissette. 2011. "Climate Change and Floodplain Delineation in Two Southern Quebec River Basins." *Journal of the American Water Resources Association* 47 (4): 785–99.

- Lallemant, David, and Anne Kiremidjian. 2015. "A Beta Distribution Model for Characterizing Earthquake Damage State Distribution." *Earthquake Spectra* 31 (3). Earthquake Engineering Research Institute: 1337–52.
- Lastra, J, Ae E Fernández, Ae A Díez-Herrero, Ae J Marquínez, E Fernández, A Díez-Herrero, and J Marquínez. 2008. "Flood Hazard Delineation Combining Geomorphological and Hydrological Methods: An Example in the Northern Iberian Peninsula." *Nat Hazards* 45: 277–93.
- Lelièvre, Marie-Andrée, Thomas Buffin-Bélanger, and François Morneau. 2008. "L'approche Hydrogéomorphologique Pour La Cartographie Des Zones À Risque D'inondation Dans Les Vallées de Petites et Moyennes Tailles : Un Exemple Commenté Pour La Vallée de La Rivière-Au-Renard." *Université Laval*, 8.
- Liu, Yan Y, David R Maidment, David G Tarboton, Xing Zheng, Ahmet Yildirim, Nazmus S Sazib, and Shaowen Wang. 2016. "A CyberGIS Approach to Generating High-Resolution Height Above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping." *CyberGIS* 16: 5.
- Lo, D.S., J. Taat, C.A.P. Lapure, A.A.O. Paduganan, G.L.B. Lamparas, and K.M. Baculio. 2017. "Flood Inundation Mapping along the Proposed Dike System of the Cagayan de Oro River: The Sendong Scale Flood." *International Journal of Sustainable Development and Planning* 12 (1). WIT Press: 165–75. doi:10.2495/SDP-V12-N1-165-175.
- LoË, Rob De. 2000. "Floodplain Management in Canada: Overview and Prospects." *Canadian Geographer* 44 (4): 355–68.
- Lucas, Neil, Sanjeevi Shanmugam, and Mike Sanjeevi. 2002. "Subpixel Habitat Mapping of a Costal Dune Ecosystem." *Applied Geography* 22 (3): 253–70.
- Luke, Christina, and Morag Kersel. 2008. "A Retrospective and a Look Forward." *Journal of Field Archaeology* 30 (2): 191–200.
- Mann, Henry B. 1945. "Nonparametric Tests Against Trend." *Econometrica* 13 (3): 245.
- Mcgehee, Ryan. 2017. "Innovators Program Summer Institute Report 2016."
- Mercer, Bryan. 2004. "DEMs Created from Airborne IFSAR – An Update," 7.

- Messier, Frédéric. 2007. "Détermination de La Ligne Des Hautes Eaux Dans Le Cadre de L'application de La Politique de Protection Des Rives, Du Littoral et Des Plaines Inondables. Le Cas Des Petits Cours D'eau Non Instrumentés."
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/24416/ch02.html#ftn.ftn19>.
- Messier, Frédéric, François Anctil, and Berthier Beaulieu. 2007. "Échelonnage de La Crue Journalière Moyenne Pour Des Bassins Versants de Superficie Entre 10 et 360 km² Au Québec." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (5): 631–36.
- Ministère de la Sécurité publique. 2018. "Ministère de La Sécurité Publique."
<https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/accueil.html>.
- Ministère de la Sécurité publique Canada. 2015. "Programme National D'atténuation Des Catastrophes (PNAC)." <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/dsstr-prvntn-mtgtn/ndmp/index-fr.aspx>.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2016. "Zones Inondables - Informations Générales."
<http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/>.
- Moel, H De, N E M Asselman, and J C J H Aerts. 2012. "Uncertainty and Sensitivity Analysis of Coastal Flood Damage Estimates in the West of the Netherlands." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 12: 1045–58.
- MRC de Papineau. 2004. "Plan de Développement Intégré de La Rivière Petite Nation," 48.
- Municipalité de ville de Québec. 2016. "Contraintes Naturelles." Edited by Québec.
- Nadarajah, Saralees. 2007. "A Truncated Inverted Beta Distribution with Application to Air Pollution Data," 285–89.
- Nobre, A. D., L. A. Cuartas, M. Hodnett, C. D. Rennó, G. Rodrigues, A. Silveira, M. Waterloo, and S. Saleska. 2011. "Height Above the Nearest Drainage - a Hydrologically Relevant New Terrain Model." *Journal of Hydrology* 404 (1–2): 13–29.
- Nobre, Antonio Donato, Luz Adriana Cuartas, Marcos Rodrigo Momo, Dirceu Luís Severo, Adilson Pinheiro, and Carlos Afonso Nobre. 2016. "HAND Contour: A New Proxy Predictor of Inundation Extent." *Hydrological Processes* 30 (2): 320–33.
- Observatoire Régional de l'Environnement Poitou-Charentes. 2016. "Qu'est Ce Qu'une Crue, Une Inondation ?" <http://www.eau-poitou-charentes.org/Qu-est-ce-qu-une-crue-une.html>.

- Ontario Ministry of Natural Resources Water. 2002. "Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit."
- Ouarda, T.B.M.J., and S. El-Adlouni. 2011. "Bayesian Nonstationary Frequency Analysis of Hydrological Variables1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 47 (3): 496–505.
- P. Simonović, Slobodan. 1999. "Social Criteria for Evaluation of Flood Control Measures: Winnipeg Case Study." *Urban Water* 1 (2): 167–75.
- Raclot, Damien. 2003. "Méthodologie D'exploitation Quantitative Des Photographies Aériennes D'inondation de Plaine." Montpellier. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003257/document>.
- Rokni, Komeil, Anuar Ahmad, Ali Selamat, and Sharifeh Hazini. 2014. "Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery." *Remote Sensing* 6 (5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 4173–89.
- Sheng, Yongwei, Chunqiao Song, Jida Wang, Evan A Lyons, Benjamin R Knox, Joshua S Cox, and Feng Gao. 2016. "Representative Lake Water Extent Mapping at Continental Scales Using Multi-Temporal Landsat-8 Imagery." *Remote Sensing of Environment* 185: 129–41.
- Shrubsole, Dan, Greg Brooks, Robert Halliday, Emdad Haque, Ashij Kumar, Jacinthe Lacroix, Harun Rasid, Jean Rousselle, and Slobodan P Simonovic. 2003. "An Assessment of Flood Risk Management in Canada." Institute for Catastrophic Loss Reduction.
- Smith, A., C. Sampson, and P. Bates. 2015. "Regional Flood Frequency Analysis at the Global Scale." *Water Resour.Res.* 51: 539–53.
- Stehman, Stephen V. 1996. "Estimating the Kappa Coefficient and Its Variance under Stratified Random Sampling," 401–7.
- Sulaiman, M.Yusof, W.M Hlaing Oo, Mahdi Abd Wahab, and Azmi Zakaria. 1999. "Application of Beta Distribution Model to Malaysian Sunshine Data." *Renewable Energy* 18 (4): 573–79.
- Tan, T. C., S. C. Ho, S. M. Chong, and A. M. Easa. 2017. "Salt Release from Yellow Alkaline Noodles." *International Food Research Journal* 24 (1): 318–26.
- Tao, Shanshan, Sheng Dong, Zhifeng Wang, and Wensheng Jiang. 2016. "Estimation of Design Sea Ice Thickness with Maximum Entropy Distribution by Particle Swarm Optimization Method." *Journal of Ocean University of China* 15 (3). Science Press: 423–28.

- Thomas, Rachael F, Richard T Kingsford, Yi Lu, Stephen J Cox, Neil C Sims, and Simon J Hunter. 2015. "Mapping Inundation in the Heterogeneous Floodplain Wetlands of the Macquarie Marshes, Using Landsat Thematic Mapper." *Journal of Hydrology* 524: 194–213.
- Tucker, Compton J. 1979. "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation." *Remote Sensing of Environment* 8 (2). Elsevier: 127–50.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425779900130>.
- Tulbure, Mirela G, Mark Broich, Stephen V Stehman, and Anil Kommareddy. 2016. "Surface Water Extent Dynamics from Three Decades of Seasonally Continuous Landsat Time Series at Subcontinental Scale in a Semi-Arid Region." *Remote Sensing of Environment* 178: 142–57.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2002. "Guidelines for Reducing Flood Losses."
- USGS. 2018. "Landsat Thematic Mapper (TM/ETM) Sensor." <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>.
- Viera, Anthony J., and Joanne M. Garrett. 2005. "Kappa_statisitc_paper." *Family Medicine*. Vol. 37.
- Wald, A, and J Wolfowitz. 1943. "An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation," 378–88.
- Wilcoxon, Frank. 1946. "Individual Comparisons of Grouped Data by Ranking Methods." *Journal of Economic Entomology* 39 (2): 269–70.
- Woodlands country and environment and sustainable resources. 2015. "Flood Hazard Identificaton Study of the Athabasca and Mcleod Rivers Woodlands County and Town of Whitecourt."
- World Meteorological Organization, and United Nations Educational Scientific Cultural Organization. 2012. "International Glossary of Hydrology', International Glossary of Hydrology." *International Glossary of Hydrology*.
- Xu, Hanqiu. 2005. "Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery," 3025–33.
<http://www.aari.ru/docs/pub/060804/xuh06.pdf>.

- Yamazaki, Dai, Mark A Trigg, and Daiki Ikeshima. 2015. "Development of a Global ~90m Water Body Map Using Multi-Temporal Landsat Images." *Remote Sensing of Environment* 171: 337–51.
- Yao, Augustine Y. M., and Augustine Y. M. Yao. 1974. "A Statistical Model for the Surface Relative Humidity." *Journal of Applied Meteorology* 13 (1): 17–21.
- Yu, D., and S. N. Lane. 2006. "Urban Fluvial Flood Modelling Using a Two-Dimensional Diffusion-Wave Treatment, Part 1: Mesh Resolution Effects." *Hydrological Processes* 20 (7): 1541–65.
- Zerger, A. 2002. "Examining GIS Decision Utility for Natural Hazard Risk Modelling." *Environmental Modelling & Software* 17 (3): 287–94.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815201000718>.
- Zhang, Lianjun, Chuangmin Liu, Craig J. Davis, Dale S. Solomon, Thomas B. Brann, and Lawrence E. Caldwell. 2004. "Fuzzy Classification of Ecological Habitats from FIA Data." *Forest Science* 50 (1): 117–27.