

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

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARACTÉRISATION ET D'ÉVALUATION DU RISQUE HUMAIN LIÉ AUX INONDATIONS EN MILIEU URBAIN

Par

Marion Tanguy

Thèse présentée pour l'obtention du grade de
Philosophiae doctor (Ph.D.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et examineur interne	Miroslav Nastev Ressources Naturelles Canada Commission Géologique du Canada
Examineur interne	Sophie Duchesne INRS Centre Eau Terre Environnement
Examineur externe	Claude Codjia Département de géographie Université du Québec à Montréal
Examineur externe	Nathalie Barrette Département de géographie Université Laval
Directeur de recherche	Monique Bernier INRS Centre Eau Terre Environnement
Codirecteur de recherche	Karem Chokmani INRS Centre Eau Terre Environnement

REMERCIEMENTS

Cette thèse de doctorat a été réalisée au sein du laboratoire de télédétection environnementale et nordique de l'INRS-ETE, dans le cadre du projet GARI (Gestion et Analyse du Risque d'Inondation). Ce projet a été financé par le Centre des sciences pour la Sécurité (CSS) de Recherche et Développement pour la Défense Canada (RDDC), dans le cadre de son Programme Canadien pour la Sûreté et la Sécurité (PCSS). Il a également reçu un appui financier et technique de la part du ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSP), également partenaire du projet GARI. Je tiens donc à remercier en premier lieu les responsables du PCSS et du MSP de m'avoir permis de mener à bien ce travail.

Je remercie également le MSP ainsi que Sécurité Publique Canada pour l'apport de l'ensemble des images satellitaires de l'inondation de la rivière Richelieu, ainsi que le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), pour l'apport des données hydrauliques et géospatiales requises par ce projet.

Je souhaiterais également remercier les évaluateurs internes et externes de cette thèse, M. Miroslav Nastev, Mme Sophie Duchesne, Mme Nathalie Barrette et M. Claude Codjia, qui ont accepté d'accorder du temps à la lecture de cette longue thèse et à son évaluation.

Je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude à la professeure Monique Bernier, directrice de ce travail de doctorat, pour m'avoir permis de travailler sur un sujet particulièrement adapté à ma formation de géographe et à mes intérêts, mais aussi pour son appui constant et ses nombreux conseils tout au long de mes travaux. Je la remercie de m'avoir intégrée à son équipe et de m'avoir accordé sa confiance lors de deux stages de maîtrise, qui m'ont donné envie de poursuivre des études de doctorat sous sa direction.

Je remercie également le professeur Karem Chokmani, mon co-directeur, pour ses conseils scientifiques précieux, pour son appui et ses encouragements tout au long de mon doctorat. Je le remercie d'avoir pris le temps de m'expliquer, et parfois de me réexpliquer, certains concepts qui m'ont permis d'améliorer ces travaux de thèse et d'enrichir mes connaissances. Enfin, je souhaite le remercier pour les nombreuses discussions que nous avons eues au cours de ces années, et pour son écoute.

Je tiens à remercier M. Jimmy Poulin professionnel de recherche au laboratoire de télédétection, pour son aide technique, ainsi que M. Yves Gauthier, également professionnel de recherche,

pour son aide tout au long de ce projet. Je remercie également M. Malo Pennober, stagiaire et étudiant en maîtrise à l'Université de Nantes (France), pour l'aide apportée lors de cette dernière année de thèse, et dont le travail efficace a permis de finaliser mes travaux.

Je tiens à remercier la Municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, partenaire du projet GARI, pour l'apport de données d'évaluation foncière, de données géospatiales et de rapports d'intervention nécessaires au projet. Je tiens également à exprimer ma gratitude aux coordinateurs municipaux de sécurité civile des municipalités et autres intervenants municipaux en sécurité civile des villes de Lévis, Sainte-Marie, Vallée-Jonction et de Saint-Lambert-de-Lauzon, ainsi qu'aux conseillers régionaux en sécurité civile et ingénieurs du MSP, pour avoir pris le temps de me rencontrer et de répondre à mes nombreuses questions.

Mes remerciements s'adressent également à mes collègues de travail et amis, pour les échanges que nous avons eus tout au long de ces années, et dont le support aussi bien technique que moral mais aussi la bonne humeur, ont été plus qu'appréciés : Yannick Duguay, Sophie Dufour-Beauséjour, Parvin Kalantari, Sophie Roberge, Chaïma Touati, Anas El Alem, Khalid Oubennaceur, Noumonvi Yawu Sena.

Je n'oublie bien sûr pas de remercier mes amis de Québec, qui, chacun à leur manière, ont enrichi cette expérience québécoise et ont réussi très efficacement à me faire penser à autre chose qu'à mes inondations quand cela était nécessaire. Julie, Nathalie, Clémence, Antoine, Maxime, William, un grand merci à vous tous! Merci également à mes amis de France, Yann, Magali et Cynthia, ainsi que Pauline et Adeline, mes géographes de Rennes, pour leur présence lors de mes retours en France et pour leur suivi indéfectible par courriel!

Enfin, je tiens à remercier ma famille et plus particulièrement mes parents et mes sœurs. Merci de m'avoir donné tous les moyens de mener à bien mes études, pour ce soutien constant qui m'a permis de garder le cap et qui m'a donné du courage lors des nombreux voyages de retour vers le Québec.

Enfin, un (très!) grand merci à mon conjoint, Marc, qui m'a supportée et soutenue tout au long de ces 5 années de thèse, qui m'a apporté une aide précieuse sur R et qui a su être une oreille particulièrement attentive.

RÉSUMÉ

Les inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes dans le monde affectant le plus grand nombre d'individus chaque année. Si le nombre de décès liés à ces phénomènes a baissé de manière importante depuis les années 1980, l'inondation d'une zone habitée induit de manière presque systématique une détresse des populations et un besoin de soutien parfois important. Afin de pouvoir gérer au mieux ce type d'évènements, les services en charge de la sécurité civile doivent disposer d'outils leur permettant d'évaluer avec précision les niveaux de risque en cours pour la population. Une telle information permet en effet de localiser les individus ayant besoin d'assistance et ainsi de définir les actions à mener, et les ressources humaines et matérielles à engager. Or, les outils d'évaluation du risque humain lié à une inondation en cours présentent certaines insuffisances, pouvant limiter leur utilisation opérationnelle au cours de la phase d'intervention. L'objectif de cette recherche doctorale était ainsi de développer un outil d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation, tant en milieu urbain que rural, pouvant être utilisé en soutien à la prise de décision lors de la phase d'intervention au cours d'une inondation.

Le premier volet s'intéressait au développement d'une méthode de caractérisation spatiale d'une inondation en cours, utilisant des données radar satellitaires et des données à caractère hydraulique, et permettant de déterminer l'étendue des zones inondées en milieu urbain et rural, ainsi que la hauteur d'eau en tout point de ces zones. La méthode originale proposée, combinant des données RSO en bande C et en polarisation HH et des données d'intervalles de récurrence d'inondation estimées en tout point de la zone d'étude, a été appliquée à deux images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin, acquises durant l'inondation de la rivière Richelieu (Québec) au printemps 2011. Les précisions des classifications sont supérieures à celles obtenues dans des études aux objectifs similaires (Giustarini *et al.*, 2013, Mason *et al.*, 2012b), avec des taux de 86% (Ultra-Fin) et de 87% (Fin) de pixels correctement identifiés en zone urbaine, et de 96% (Ultra-Fin) et 97% (Fin) en zone rurale. L'intérêt d'utiliser de manière combinée des données RSO et des données d'intervalles de récurrence d'inondation, qui n'avaient jusque-là jamais été exploitées pour la détection des zones urbaines et rurales inondées, a ainsi été illustré.

Une méthode estimant les hauteurs d'eau en zone inondée à partir des données d'élévation et de la carte des zones inondées de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin a également été proposée et testée. Le RMSE des hauteurs d'eau estimées est de 8 cm et l'erreur moyenne n'est que de 5 cm lorsque comparées aux données de validation disponibles. Des tests sur des surfaces plus étendues, et pour lesquelles des données de validation des hauteurs d'eau recueillies au cours de l'inondation seraient disponibles, seront cependant nécessaires pour valider l'efficacité et la précision de cette méthode.

Le second volet de cette thèse consistait en le développement de méthodes d'évaluation puis de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain face à une inondation en cours, à l'échelle du bâtiment. L'approche proposée associe trois composantes de la vulnérabilité, n'ayant jusqu'à présent jamais été combinées dans une telle étude, et dont l'intégration a été validée par des experts en sécurité civile. Il s'agit 1) de la vulnérabilité sociale et économique, 2) de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles et 3) de l'exposition de la population à l'échelle du bâtiment. Chacune de ces composantes a fait l'objet d'une méthode d'évaluation spécifique, intégrant des indicateurs de vulnérabilité identifiés avec l'aide d'experts. Les valeurs de hauteur d'eau générées dans le premier volet sont mises à profit dans ces méthodes. C'est là un des aspects innovants de ce second volet, puisque les approches orientées vers la phase d'intervention utilisent de manière presque systématique des données issues de la modélisation hydraulique. Les résultats de l'évaluation de chaque composante de la vulnérabilité sont exprimés à l'aide d'une échelle à 4 niveaux, à savoir « Faible, Sérieux, Sévère et Très Sévère », et sont cartographiés à l'échelle du bâtiment. Le niveau de risque humain lié à l'inondation en cours est défini au moyen du plus fort niveau de vulnérabilité de l'ensemble des composantes de la vulnérabilité humaine intégrées à la méthode, et est cartographié à l'échelle du bâtiment. Un intérêt particulier a été porté à la disponibilité des données requises par ces méthodes, pour permettre leur application au plus grand nombre de scénarios d'inondation possible.

Enfin, le dernier volet de la thèse consistait en la démonstration de la pertinence de la méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours comme outil d'aide à la décision lors de la phase d'intervention, à l'aide d'un scénario d'inondation réel. Une zone à dominante résidentielle fortement touchée par l'inondation de la rivière Richelieu en 2011 a été choisie et l'ensemble des méthodes ont été appliquées. Afin de faciliter la génération de l'évaluation du risque humain, une suite de protocoles a été créée et l'outil d'aide à la décision a été automatisé. Une cartographie détaillée et aisément interprétable du niveau de risque à

l'échelle du bâtiment a ainsi été obtenue et discutée. D'autres tests à l'aide d'autres scénarios d'inondation devront être faits pour valider les performances de cet outil d'aide à la décision et pour lui apporter les modifications qui pourraient s'imposer pour mieux répondre aux besoins des utilisateurs.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XIX
LISTE DES ABBREVIATIONS	XXI
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Portrait des inondations dans le monde	1
1.2 Typologie des inondations en milieu urbain et péri-urbain.....	3
1.3 Notions de risque, d'aléa et de vulnérabilité	5
1.4 Les différentes phases de la gestion du risque d'inondation	8
1.5 Problématique.....	11
1.5.1 Limites des approches de cartographie des zones inondées.....	13
1.5.2 Limites des approches d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations	17
1.6 Objectifs de la thèse	20
1.7 Plan de la thèse	21
<i>PARTIE 1 CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION</i>	<i>23</i>
2. ETAT DE L'ART DES APPROCHES DE CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION.....	25
2.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation.....	25
2.1.1 Les relevés sur le terrain	26
2.1.2 La modélisation hydraulique	26
2.1.3 La télédétection optique	27
2.1.4 La télédétection à micro-ondes passives	29
2.1.5 La télédétection à micro-ondes actives.....	29
2.2 Signatures radar des surfaces inondées	32
2.2.1 Signatures radar des plans d'eau libre et des sols nus inondés.....	32
2.2.2 Signature radar des surfaces d'eau en présence de vent	34

2.2.3	Signature radar de la végétation et des zones boisées inondées	35
2.2.4	Les zones urbaines inondées	39
2.3	Détection des zones inondées à l'aide de l'imagerie RSO : un état de l'art	42
2.3.1	L'interprétation visuelle	42
2.3.2	Les classifications supervisées	43
2.3.3	Les techniques de seuillage	44
2.3.4	La logique floue	45
2.3.5	La détection des changements par amplitude	47
2.3.6	L'interférométrie radar	49
2.3.7	Les approches contextuelles	52
2.3.8	L'utilisation de données auxiliaires	57
2.3.9	Méthodes d'extraction des hauteurs d'eau dans les zones inondées	63
2.4	Sommaire	69
3.	CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION	73
3.1	Méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées	73
3.1.1	Méthode d'estimation de l'intervalle de récurrence d'inondation en tout point de la plaine inondable	76
3.1.2	Classification orientée-objets des zones inondées en eau libre	81
3.1.3	Cartographie des zones urbaines et rurales inondées	94
3.2	Méthode d'estimation des hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée	95
3.3	Zone test : la rivière Richelieu	98
3.3.1	Caractéristiques générales du bassin versant de la rivière Richelieu	98
3.3.2	Inondation de la rivière Richelieu au printemps 2011	100
3.4	Données disponibles	104
3.4.1	Données RADARSAT-2	104
3.4.2	Prétraitement des images RADARSAT-2	109
3.4.3	Données nécessaires à la production de la carte des intervalles de récurrence d'inondation	114
3.4.4	Données de validation des étendues des zones urbaines et rurales inondées	123
3.4.5	Prétraitements et exploitation des images GeoEye-1 et IKONOS-2	125
3.4.6	Données de validation des hauteurs d'eau dans les zones inondées	129
3.5	Sommaire	132
4.	RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION	133
4.1	Classification orientée-objets des zones inondées en eau libre	133

4.1.1 Classification initiale des zones d'eau libre	133
4.1.2 Classification raffinée de l'eau libre	146
4.1.3 Pertinence de la position des seuils σ_{10} et σ_{20}	154
4.2 Cartographie des zones urbaines et rurales inondées	156
4.2.1 Analyse des erreurs de sous-estimation de l'étendue de l'inondation	161
4.2.2 Analyse des erreurs de surestimation de l'étendue de l'inondation	173
4.3 Avantages et limites de la méthode proposée	179
4.4 Estimation des hauteurs d'eau dans les zones urbaines et rurales inondées	181
4.4.1 Précision des estimations des hauteurs d'eau en zone inondée	183
4.4.2 Avantages et limites de la méthode	190
4.5 Potentiel d'utilisation des méthodes en mode opérationnel	191
4.5.1 Paramètres d'acquisition des images RSO à privilégier	192
4.5.2 Automatisation des méthodes	193
4.5.3 Temps de traitement	193
4.6 Sommaire	194
PARTIE 2 ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE HUMAIN À UNE INONDATION EN COURS	197
5. ÉTAT DE L'ART DES APPROCHES D'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA POPULATION À L'ALÉA INONDATION	199
5.1 Théories et dimensions de la vulnérabilité humaine	200
5.1.1 Définition du concept de vulnérabilité humaine	200
5.1.2 Approches conceptuelles de la vulnérabilité	202
5.1.3 Facteurs de vulnérabilité	208
5.1.4 Composantes de la vulnérabilité	209
5.1.5 Dynamiques temporelles et spatiales de la vulnérabilité	211
5.2 Évaluer la vulnérabilité	214
5.2.1 Les indicateurs de vulnérabilité et leur sélection	214
5.2.2 Exemples d'indicateurs de vulnérabilité humaine aux aléas naturels	217
5.2.3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à l'aléa inondation	218
5.2.4 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité humaine orientée vers la phase d'intervention	228
5.3 Sommaire	235

6. MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE HUMAIN LIÉS À UNE INONDATION EN COURS	239
6.1 Bases du développement des méthodes	239
6.1.1 Consultation d'experts en sécurité civile	240
6.1.2 Développement de questionnaires à l'adresse des experts en sécurité civile	242
6.1.3 Réponses obtenues aux questionnaires	250
6.2 Données disponibles pour l'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité	262
6.2.1 Données disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population	264
6.2.2 Données disponibles pour l'évaluation de l'exposition de la population	267
6.2.3 Données disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles	272
6.3 Méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours	274
6.3.1 Évaluation et cartographie de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation	276
6.3.2 Évaluation et cartographie de l'exposition de la population au cours de l'inondation	283
6.3.3 Évaluation et cartographie de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles	289
6.3.4 Évaluation et cartographie du risque humain lié à une inondation en cours	295
6.4 Sommaire	297
7. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION ET DE LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE HUMAIN LIÉS À UNE INONDATION EN COURS	299
7.1 Présentation des données disponibles et de la zone test	299
7.1.1 Données disponibles	300
7.1.2 Localisation de la zone d'étude	302
7.2 Résultats de l'évaluation et de la cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours	303
7.2.1 Vulnérabilité socio-économique	303
7.2.2 Exposition de la population à l'inondation en cours	311
7.2.3 Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles	318
7.2.4 Risque humain lié à une inondation en cours	322
7.3 Potentiel d'utilisation des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque en phase d'intervention	324
7.3.1 Caractéristiques de l'outil d'aide à la décision	325

7.3.2 Limites à l'utilisation opérationnelle de l'outil d'aide à la décision.....	327
7.3.3 Améliorations potentielles des méthodes et de l'outil d'aide à la décision.....	328
7.4 Sommaire	331
8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	335
8.1 Résumé des contributions scientifiques	335
8.1.1 Première contribution : caractérisation spatiale d'une inondation en cours	335
8.1.2 Deuxième contribution: évaluation et cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours	338
8.1.3 Troisième contribution : l'outil d'aide à la décision	340
8.2 Perspectives de recherche.....	341
RÉFÉRENCES.....	345
ANNEXE I CARACTÉRISTIQUES ET IMPACTS HUMAINS ET ÉCONOMIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES D'INONDATION.....	375
ANNEXE II RÉSULTATS DES CLASSIFICATIONS DE L'EAU LIBRE, ET DES ZONES URBAINES ET RURALES INONDÉES, EN NOMBRE DE PIXELS.....	379
ANNEXE III CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU DANS L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	381
ANNEXE IV EXEMPLES D'INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER DIFFÉRENTES DIMENSIONS DE LA VULNÉRABILITÉ HUMAINE AUX ALÉAS NATURELS	383
ANNEXE V QUESTIONNAIRES SUR LA VULNÉRABILITÉ HUMAINE À L'ALÉA INONDATION SOUIS À DES EXPERTS DE LA SÉCURITÉ CIVILE DU QUÉBEC	387

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Occurrence des désastres naturels par type de désastre (1994-2013) (tirée de Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2015)	1
Figure 1.2: Localisation des sites ayant connu des inondations majeures au Québec entre 1990 et 2012 (adaptée de Sécurité Publique Canada, 2015)	2
Figure 1.3: Représentation des enjeux (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015).....	6
Figure 1.4: Représentation de l'aléa (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015).....	7
Figure 1.5: Représentation du risque (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015).....	8
Figure 1.6: Continuum de la gestion des urgences au Canada (tirée de Sécurité Publique Canada, 2010)	9
Figure 3.1: Organigramme méthodologique de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées.....	75
Figure 3.2: Organigramme méthodologique pour l'estimation des intervalles de récurrences d'inondation en tout point de la plaine inondable	78
Figure 3.3: Diagramme conceptuel de l'algorithme de segmentation multi-résolution du logiciel eCognition Developer 8 (traduit de Definiens AG (2011)).....	83
Figure 3.4: Boîte de dialogue de l'algorithme de segmentation Multi-résolution d'eCognition Developer 8.....	84
Figure 3.5: Forme de la fonction d'appartenance standard de forme Z.....	91
Figure 3.6: Organigramme méthodologique de la méthode d'estimation des hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée	96
Figure 3.7: Localisation des bassins versants de la rivière Richelieu, de la baie Missisquoi et du lac Champlain	99
Figure 3.8: Carte de la partie amont de la rivière Richelieu localisant les principales villes dans la région d'étude, ainsi que les stations hydrométriques et météorologiques citées dans ces travaux.....	101
Figure 3.9: Débits mesurés à la station Rapides Fryers (02OJ007) d'Environnement Canada au cours de l'année 2011, avec les débits maximaux, minimaux et médians estimés à la station entre 1937 et 2014 (Environnement Canada, 2015).....	102
Figure 3.10: Prises de vues aériennes de l'inondation de la rivière Richelieu en mai 2011 (tirée du Journal de Montréal, 2011).....	103
Figure 3.11: Image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin acquise le 1er mai 2011, et zoom sur une région présentant une augmentation de la rétrodiffusion de la surface de l'eau....	107
Figure 3.12: Image RADARSAT-2 en mode Fin acquise le 7 mai 2011, et zoom sur une région présentant une rétrodiffusion spéculaire caractéristiques des zones d'eau non affectées par la présence de vent.....	108
Figure 3.13: Surfaces couvertes par les sous-images créées à partir des images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin, ainsi que les surfaces couvertes par les données de validation associées à chaque image RADARSAT-2.....	113

Figure 3.14: Couverture LIDAR aéroportée disponible au Québec (tirée de Néogis, 2015)	117
Figure 3.15: Exemple de secteurs de rivière pour lesquelles des données de cotes de crues sont disponibles, dans les régions de la ville de Montréal (A) et de Québec (B) (adaptée de Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2015).....	122
Figure 3.16: Exemple de données de validation extraites de l'image GeoEye-1 acquise le 1er mai 2011, pour la zone sud de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu (A) et localisation de cette zone (B).....	127
Figure 3.17: Exemples de zones au niveau desquelles la délimitation manuelle des zones inondées a été difficile. A : Extrémités des champs inondés; B : Zones résidentielles inondées; C : Arbres et arbustes inondés	128
Figure 3.18: Carte des hauteurs d'eau de validation pour une partie de la zone urbaine inondée.	131
Figure 4.1: FDP Gamma des rétrodiffusions moyennes des objets d'eau libre des images RS-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin	134
Figure 4.2: Résultats cartographiques de la classification initiale des zones d'eau libre pour les images RS-2 du 1 ^{er} et du 7 mai 2011	136
Figure 4.3: Cartographie des erreurs d'omission (en jaune) des plans d'eau libre dues à la présence de vagues à leur surface.....	138
Figure 4.4: Effet du phénomène de double rebond à l'interface eau libre-végétation sur les résultats de la classification orientée-objets	139
Figure 4.5: Analyse des valeurs de rétrodiffusion moyennes des objets contenant des erreurs d'omission et des valeurs de rétrodiffusion des pixels formant ces objets	141
Figure 4.6: Effet de la différence de résolution spatiale entre les données RS-2 et les données de validation sur les résultats de la classification aux extrémités des champs inondés	142
Figure 4.7: Cartographie des erreurs de commission typiques des classifications de l'eau libre sur les images RS-2 en modes Ultra-Fin et Fin	143
Figure 4.8: Illustration des erreurs de commission en milieu rural dues à des surfaces nues et lisses.....	145
Figure 4.9: Localisation d'erreurs de commission au milieu de végétation inondée et aux extrémités de champs inondés.....	146
Figure 4.10: Carte des intervalles de récurrence d'inondation estimée pour la rivière Richelieu (A) et localisation de la zone présentée (B)	147
Figure 4.11: Résultats de la classification de l'eau libre après l'étape de raffinement basée sur les degrés d'appartenance à la classe Eau libre.....	150
Figure 4.12: Histogramme des fréquences des valeurs d'appartenance à la classe Eau libre des objets contenant des erreurs de commission après la première étape de raffinement de la classification	151
Figure 4.13: Carte de contingence de la classification de l'Eau libre obtenue à l'issue des étapes de raffinement de la classification	153
Figure 4.14: Cartographies des zones inondées pour les 1er mai (image RS-2 mode Ultra-Fin) et 7 mai 2011 (image RS-2 mode Fin) et des erreurs associées	159
Figure 4.15: Localisation des zones de sous-estimation (en jaune) et de surestimation (en rouge) de la présence d'eau en zone urbaine	161

Figure 4.16: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U1	162
Figure 4.17: Intervalles de récurrence d'inondation extraits de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U1	162
Figure 4.18: Terrain entourant un bâtiment considéré comme non inondé par la cartographie (bâtiment A) et un bâtiment considéré comme inondé (bâtiment B).....	164
Figure 4.19: Localisation de deux zones urbaines résidentielles inondées (identifiées U2 et U3) considérées comme non inondées dans les cartographies des 1er mai et 7 mai 2011	165
Figure 4.20: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U2	166
Figure 4.21: Intervalles de récurrence d'inondation extraits de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U2	166
Figure 4.22: Élévations de points aux limites des plaines inondables de récurrences 2 ans, 20 ans et 100 ans, pour une zone représentant des erreurs d'omission.....	167
Figure 4.23: Localisation des zones d'erreurs d'omission aux extrémités de champs inondés	168
Figure 4.24: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites d'une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation (Zone rurale R1)	170
Figure 4.25: Intervalles de récurrence d'inondation extraits d'une surface présentant une sous-estimation de l'étendue de l'inondation (Zone rurale R1).....	170
Figure 4.26: Localisation d'erreurs d'omission dues à l'action du vent dans un champ partiellement inondé.....	171
Figure 4.27: Élévations du sol pour une zone d'omission située au milieu d'un champ partiellement inondé.....	172
Figure 4.28: Intervalles de récurrence d'inondation d'une zone d'erreur d'omission au centre d'un champ partiellement inondé.....	172
Figure 4.29: Localisation d'une zone majeure d'erreur de commission dans un champ non inondé, pour la cartographie du 1 ^{er} mai 2011	173
Figure 4.30: Localisation de zones d'erreurs de commission typiques en zones urbaines et rurales.....	175
Figure 4.31: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone urbaine (Zone U4).....	177
Figure 4.32: Intervalles de récurrence d'inondation pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone urbaine (Zone U4).....	177
Figure 4.33: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone rurale (Zone R3).....	178
Figure 4.34: Intervalles de récurrence d'inondation pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone rurale (Zone R3)	178
Figure 4.35: Hauteurs d'eau estimées dans la zone de validation, le 1er mai 2011	182
Figure 4.36: Analyse de l'évolution spatiale des hauteurs d'eau pour une section de la zone de validation. Les hauteurs d'eau sont nettement plus élevées au niveau de la rivière, puis diminuent de manière significative sur la portion terrestre de la zone inondée. Elles diminuent ensuite de manière importante mais progressive autour des bâtiments 1 et 2.....	183

Figure 4.37: Carte des différences entre les hauteurs d'eau estimées pour le 1 ^{er} mai et les données de validation	188
Figure 4.38: Élévations des points utilisés pour l'interpolation des surfaces d'eau, dans une zone présentant des différences de hauteurs d'eau inférieures à -15 cm (a), supérieures à 15 cm (b) et comprises entre 0 cm et 15 cm.....	189
Figure 5.1: Le modèle de la vulnérabilité « Hazard-of-Place » (tiré de Cutter, 1996)	204
Figure 5.2: Le modèle « Pressure and Release » (tiré de Blaikie <i>et al.</i> , 1994).....	205
Figure 5.3: Le cadre conceptuel de la vulnérabilité BBC (tiré de Birkmann, 2006).....	207
Figure 5.4: Représentation de la dynamique temporelle de la vulnérabilité (adapté de Schneiderbauer, 2007).....	213
Figure 5.5: Processus de développement d'indicateurs de vulnérabilité (traduit de Ciurean <i>et al.</i> , 2013).....	216
Figure 6.1: Bâtiment résidentiel de plain-pied avec sous-sol et bâtiment à étage sans sous-sol, typiques de l'habitat résidentiel québécois (Google Street View, 2016).....	268
Figure 6.2: Exemple de données de forme et d'emplacement des bâtiments, sous forme de polygones.....	270
Figure 6.3: Exemple de plan cadastral, indiquant les limites des chaque propriété foncière ainsi que son numéro de lot cadastral	271
Figure 6.4: Organigramme des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours.....	275
Figure 6.5: Organigramme de la méthode d'évaluation de l'exposition de la population à l'aléa inondation	284
Figure 6.6: Schématisation de la génération d'itinéraires permettant d'identifier les bâtiments non inondés mais isolés	291
Figure 6.7: Fichiers obtenus à la suite de la génération d'itinéraires de l'outil Network Analyst, indiquant l'ensemble des couples « point de départ – centroïde du bâtiment résidentiel » pour lesquels un itinéraire a pu être généré. Les bâtiments résidentiels accessibles par la route sont matérialisés par des points orange, alors que les bâtiments non accessibles sont matérialisés par des points noirs	293
Figure 7.1: Localisation de la zone sur laquelle les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain liés aux inondations ont été testées.....	302
Figure 7.2: Résultats de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation dans la zone test.....	306
Figure 7.3: Cartographie des types de bâtiments présents dans la zone test	312
Figure 7.4: Évaluation de l'exposition de la population par bâtiment dans la zone test, le 1 ^{er} mai 2011	313
Figure 7.5: Modifications apportées au bâtiment 1 après l'inondation de 2011, et ayant engendré des erreurs d'estimation des niveaux d'eau dans le bâtiment.....	314
Figure 7.6: Variations spatiales des hauteurs d'eau dans les bâtiments inondés.....	316
Figure 7.7: Types de bâtiments, hauteurs d'eau et niveaux d'exposition associés.....	317
Figure 7.8: Cartographie des bâtiments résidentiels isolés par l'inondation et des segments de routes inondés.....	318
Figure 7.9: Analyse des hauteurs d'eau dans des bâtiments isolés mais considérés comme non inondés	319

Figure 7.10: Identification de bâtiments non inondés mal identifiés comme « isolés ».....	320
Figure 7.11: Hauteurs d'eau sur les segments de route inondés	321
Figure 7.12: Évaluation du niveau de risque humain lié à l'inondation en cours dans la zone d'étude, le 1 ^{er} mai 2011	323
Figure 7.13: Exemple de table générée par l'outil d'évaluation du risque humain à une inondation en cours	325
Figure 7.14: Exemple de fenêtre associée à un des outils de la « boîte à outils » regroupant l'ensemble des traitements menant à l'évaluation et à la cartographie du risque humain lié à une inondation en cours	326

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Caractéristiques et impacts sociaux et économiques des différents types d'inondation.....	5
Tableau 2.1: Désignation des bandes radar et leurs limites en fréquences (tiré de Ulaby <i>et al.</i> , 2014).....	30
Tableau 3.1: Paramètres de la segmentation multi-résolution des images RSO d'inondation...	86
Tableau 3.2: Paramètres d'acquisition principaux des images RS-2 sélectionnées.....	105
Tableau 3.3: Nombre de points de contrôle et précision de la correction géométrique obtenue pour les images RADARSAT-2 à l'aide du modèle de Toutin et d'un ajustement manuel.....	112
Tableau 3.4: Taille initiale et taille réduite des images RADARSAT-2, et durée de la segmentation multi-résolution pour chaque taille d'image	114
Tableau 3.5: Classes de retour LIDAR et leurs associations	116
Tableau 3.6: Débits et niveaux d'eau selon la récurrence estimés pour différentes stations et loi statistique retenue.....	119
Tableau 3.7: Caractéristiques des images optiques IKONOS-2 et GeoEye-1 de très haute résolution	125
Tableau 3.8: Nombre de points de contrôle et précision de la correction géométrique des mosaïques d'images IKONOS-2 et GeoEye-1 obtenue à l'aide d'une transformation polynomiale.....	126
Tableau 4.1: Valeurs estimées et erreur standard des paramètres des FDP Gamma et du seuil σ_{20} pour les images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin	135
Tableau 4.2: Précision de la classification initiale des surfaces d'eau libre.....	135
Tableau 4.3: Précision de la classification des surfaces en eau libre pour les images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin.....	148
Tableau 4.4: Évaluation quantitative des cartographies des zones urbaines et rurales inondées	157
Tableau 4.5: Résultats des analyses statistiques de précision des estimations des hauteurs d'eau, en cm	186
Tableau 4.6: Pourcentage de l'aire totale de la zone inondée par classe de différences de hauteurs d'eau	187
Tableau 6.1: Classification des indicateurs de vulnérabilité socio-économique, selon leur influence sur la vulnérabilité	253
Tableau 6.2: Données disponibles pour l'évaluation de chaque composante de la vulnérabilité	263
Tableau 6.3: Données de recensement et de l'ENM 2011 utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique	266
Tableau 6.4: Échelle de comparaison binaire utilisée pour la comparaison par paire des indicateurs de vulnérabilité, d'après Saaty (1980) et Griot (2003)	278
Tableau 6.5: Exemple de comparaison par paire d'indicateurs de vulnérabilité sociale, à l'aide de l'échelle de comparaison binaire proposée Saaty (1980) et modifiée par Griot (2003)	279

Tableau 6.6: Valeur de l'Indice de Cohérence Aléatoire, selon le nombre d'éléments comparés dans la matrice (extrait de Saaty, 1977)	281
Tableau 6.7: Valeur relative attribuée à chaque indicateur de vulnérabilité dans une AD, selon la position de sa valeur par rapport à la valeur de l'indicateur dans l'ensemble des AD	281
Tableau 6.8: Niveaux de vulnérabilité socio-économique, selon la valeur de la vulnérabilité obtenue par la méthode de l'AMH	283
Tableau 6.9: Niveaux d'exposition de la population à l'aléa inondation.....	283
Tableau 6.10: Typologie du bâti résidentiel au Québec	285
Tableau 6.11: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments avec sous-sol.....	288
Tableau 6.12: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments sans sous-sol.....	288
Tableau 6.13: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments unimodulaires	289
Tableau 6.14: Niveau de vulnérabilité de la population induite par l'inondation du réseau routier	290
Tableau 6.15: Codes couleur utilisés pour cartographier les différentes catégories d'infrastructures essentielles	295
Tableau 7.1: Disponibilité et caractéristiques des données nécessaires à l'application des méthodes sur la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu	301
Tableau 7.2: Résultats de la comparaison par paire des indicateurs de vulnérabilité sélectionnés par les experts en sécurité civile	303
Tableau 7.3: Poids des indicateurs de vulnérabilité socio-économique	305
Tableau 7.4: Taux relatifs à chaque indicateur de vulnérabilité socio-économique, pour les 3 AD incluses dans la zone test	307
Tableau 7.5: Taux des différents indicateurs de vulnérabilité socio-économique pour des AD présentant un niveau de vulnérabilité « Très Sévère »	309
Tableau 7.6: Niveaux de vulnérabilité associés au manque d'eau potable et d'électricité	331

LISTE DES ABBREVIATIONS

ACP	Analyse en Composantes Principales
AD	Aire de diffusion
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
dB	Décibels
ENM	Enquête Nationale auprès des Ménages
FDP	Fonction de densité de probabilité
HH	Polarisation à transmission et réception horizontales
HV	Polarisation à transmission horizontale et à réception verticale
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> / Organisation Internationale de Normalisation
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MSP	Ministère de la Sécurité Publique du Québec
PCS	Points de contrôle au sol
PDCC	Programme de Détermination des Cotes de Crues
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> / Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
RS-1	RADARSAT-1
RS-2	RADARSAT-2
RSO	Radar à Synthèse d'Ouverture
SGF	<i>SAR Georeferenced Fine-Resolution</i> / RSO géoréférencé en mode Fin
SIG	Système d'Information Géographique
SLC	<i>Single Look Complex</i> / Visée unique complexe
SPC	Sécurité Publique Canada
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i> / Réseau triangulé irrégulier

1. INTRODUCTION

1.1 Portrait des inondations dans le monde

Les inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes dans le monde et sont celles qui affectent le plus grand nombre d'individus. Elles représentent ainsi près de 43% de toutes les catastrophes naturelles répertoriées de 1994 à 2013 (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2015) (Figure 1.1). Durant ces deux décennies, les inondations ont causé la mort de près de 158 000 personnes à travers le monde et en ont affecté à différents niveaux plus de 2,3 milliards. Si les décès dus aux inondations ont baissé de manière significative depuis le début des années 1980, les pertes économiques liées à ces catastrophes sont de plus en plus élevées. Elles se chiffrent en moyenne à plus de 23 milliards de dollars (US) par année. A titre de comparaison, cela correspond à plus de 140% du PIB annuel des États-Unis d'Amérique (Jha *et al.*, 2012). Les inondations sont ainsi considérées comme une des menaces les plus importantes à la sécurité des populations et au développement économique des pays qui y sont exposés.

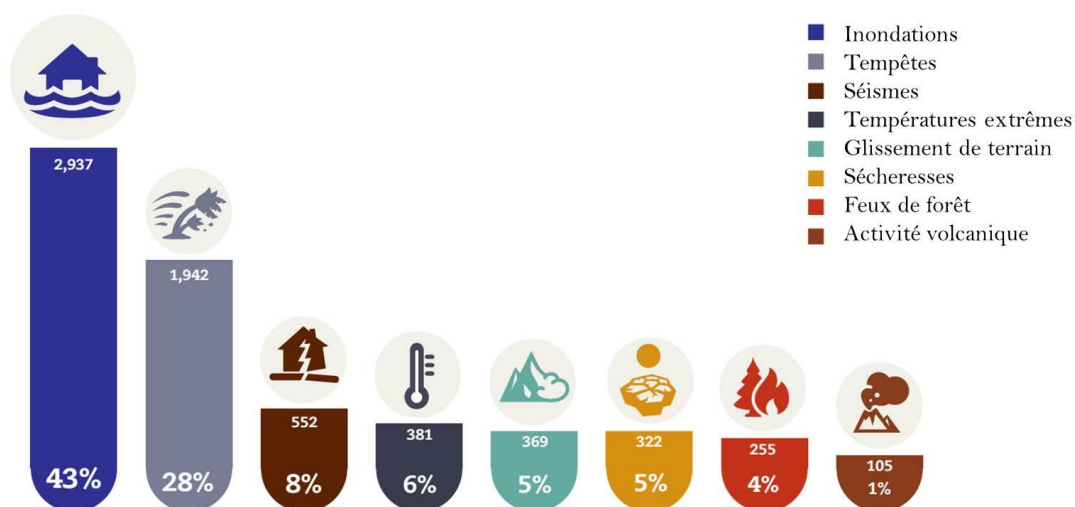


Figure 1.1: Occurrence des désastres naturels par type de désastre (1994-2013) (tirée de Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2015)

Près de 95% des décès et près de 60% des pertes économiques occasionnées par les inondations sont enregistrés dans des pays en développement, en particulier en Asie (Dewan, 2013). Les inondations d'envergure ne sont cependant pas plus nombreuses dans ces pays que dans les pays développés. Ce lourd bilan est en grande partie dû à une densité de population de plus en plus importante à l'intérieur même ou à proximité directe des plaines inondables, combinée à une forte vulnérabilité des populations exposées à cet aléa (habitat non adapté, pauvreté de la population, manque de politiques et de mesures de préparation et d'adaptation, etc.) (Doocy *et al.*, 2013).

Le Canada se trouve lui aussi régulièrement en proie à ce genre de phénomène. De 1950 à 2015, 49 inondations majeures ont touché le pays, tuant 154 personnes, en affectant plus d'1,2 millions et occasionnant près de 10 milliards de dollars de dommages (Guha-Sapir *et al.*, 2015). Au Québec, 27 inondations majeures ont été recensées entre 1990 et 2012 (Institut National de Santé Publique du Québec, 2012) (Figure 1.2). Les inondations survenues en juillet 1996 au Saguenay-Lac-Saint-Jean et plus récemment, d'avril à juin 2011 le long de la Rivière Richelieu, en sont des illustrations marquantes.

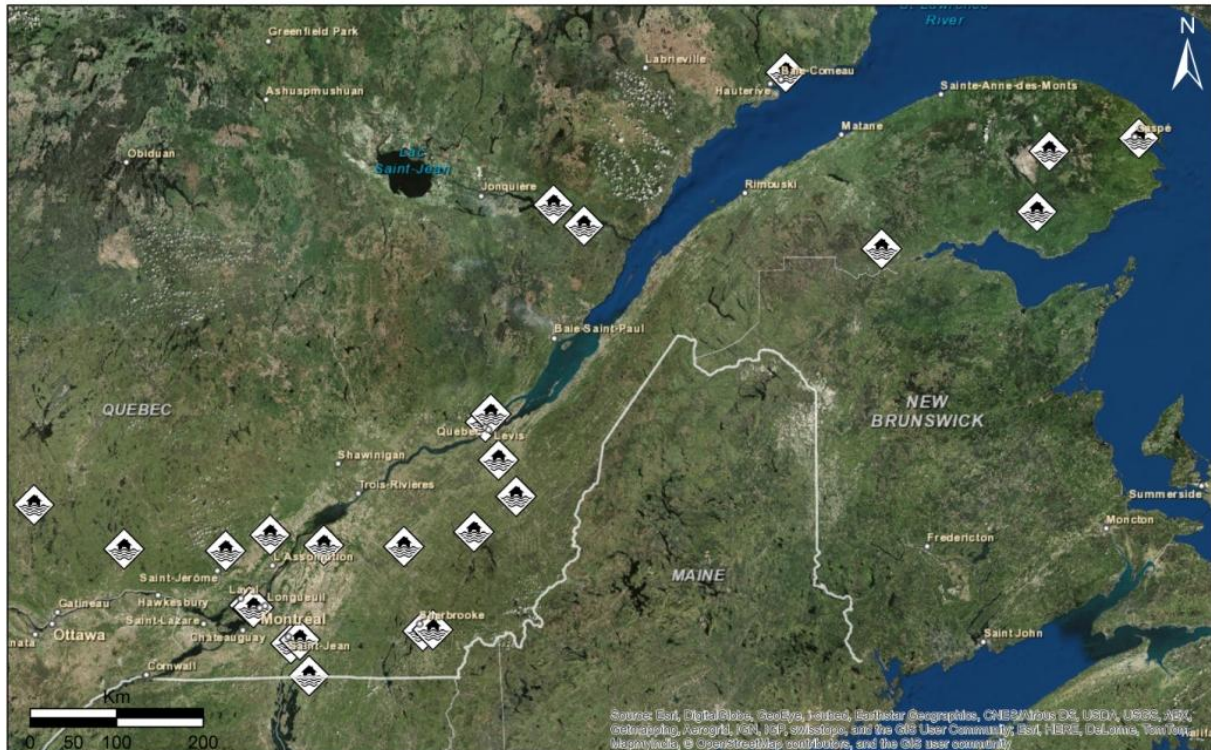


Figure 1.2: Localisation des sites ayant connu des inondations majeures au Québec entre 1990 et 2012 (adaptée de Sécurité Publique Canada, 2015)

De nombreuses études ont déjà montré que l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes liés au réchauffement du climat, combinée à l'anthropisation de plus en plus marquée des bassins fluviaux (imperméabilisation des surfaces, déforestation, disparition des terrains marécageux, etc.) entraînera dans les années à venir une augmentation importante des phénomènes d'inondations fluviales et côtières, et cela avec un fort niveau de confiance (Easterling *et al.*, 2000; Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2014; Guha-Sapir *et al.*, 2015; Hirabayashi *et al.*, 2009). Les risques liés aux inondations, qui constituent déjà une réalité bien présente dans beaucoup de pays, devraient donc se trouver renforcés dans les années à venir. Il a ainsi été estimé qu'à l'horizon 2080, 20% de la population mondiale sera exposée à un risque d'inondation accru (Arnell *et al.*, 2014; Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2013). Cependant, depuis une vingtaine d'années déjà, le nombre d'inondations a augmenté de manière très significative, affectant ainsi un nombre croissant d'individus et occasionnant une hausse importante des dégâts économiques et structurels (Jha *et al.*, 2012). La question de la gestion des risques liés aux inondations est donc de plus en plus importante pour les gouvernements et les municipalités, qui doivent se doter de stratégies et d'outils permettant d'anticiper, de gérer et de s'adapter aux mieux à ces risques.

1.2 Typologie des inondations en milieu urbain et péri-urbain

Pour beaucoup, le phénomène d'inondation correspond au débordement d'un cours d'eau hors de son lit mineur, suite à des précipitations importantes sur un bassin versant. Si cette conception du phénomène d'inondation est correcte, elle est cependant limitée à un des nombreux types d'inondations susceptibles d'affecter les sociétés. En effet, une inondation peut être définie comme le débordement d'un plan d'eau ou d'une masse d'eau, résultant en la submersion temporaire, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2013; McDonald, 1979). Cela inclut donc un large panel de phénomènes autres que les inondations fluviales, pouvant avoir des impacts sociaux et économiques très variables, et des implications différentes en termes de gestion du risque par les responsables de la sécurité civile.

L'analyse de la littérature scientifique et gouvernementale portant sur la gestion des risques liés aux inondations a montré que la description et la typologie des inondations varie parfois de

manière significative d'une étude à l'autre et d'un organisme à l'autre. Les inondations peuvent ainsi être classées selon leurs sources (Dewan, 2013; Scarwell *et al.*, 2004); leur origine naturelle ou accidentelle (Vinet, 2010); leur vitesse d'écoulement (Pottier, 2006); leurs impacts économiques et humains (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2013) ou encore selon une combinaison de ces différents critères (Jha *et al.*, 2012).

La typologie la plus couramment rencontrée dans la littérature combine les causes et les impacts économiques et humains des inondations. Elle différencie ainsi jusqu'à 6 types d'inondations : les inondations fluviales, les inondations pluviales, les inondations côtières et estuariennes, les inondations par rupture d'ouvrages de retenue d'eau, les inondations par remontée de nappe et les inondations éclair. Cette typologie est utilisée pour distinguer les différents types d'inondation, dont les caractéristiques et les impacts humains et économiques sont décrits à l'Annexe I. Le Tableau 1.1 résume ces différentes informations.

Les caractéristiques des différents types d'inondation (Tableau 1.1), et en particulier leurs cinétiques, leur hauteurs de submersion et leurs durées ne sont pas les mêmes. Leurs impacts sur les populations et les infrastructures, et ainsi sur la gestion de crise, sont donc différents. Dans le cas des inondations rapides et violentes, telles que les inondations pluviales urbaines, les inondations par rupture d'ouvrage de retenue d'eau ou les inondations éclairs et torrentielles, on peut considérer que la gestion de crise se fait sur le court terme : les pertes en vies humaines et les destructions sont importantes dès les premiers instants de l'inondation. Dans ce contexte, les mécanismes d'alerte et de prévention sont les plus adaptés à la réduction des pertes en vies humaines et éventuellement des dégâts matériels. A l'inverse, dans le cas des inondations lentes telles que les inondations fluviales, les inondations par remontée de nappe et les inondations estuariennes, la gestion de crise s'inscrit sur un plus long terme : les pertes en vies humaines sont très rares et les dégâts matériels sont généralement peu importants dans les premières heures de l'inondation, mais augmentent avec la durée de submersion. Les outils permettant de spatialiser et d'évaluer avec précision les risques humains et économiques en temps quasi-réel constituent alors un support important aux opérations de gestion de crise.

Tableau 1.1: Caractéristiques et impacts sociaux et économiques des différents types d'inondation

Type d'inondation	Cinétique	Hauteur de submersion	Impact population	Dommages économiques
Fluviale ou de plaine	Lente	De quelques cm à plus d'1 m	Faible	Variet selon le temps de submersion
Par rupture d'embâcle	Soudaine	De quelques cm à plus d'1 m	Élevé	Dommages élevés
Pluviale urbaine	Soudaine	Plusieurs m	Potentiellement élevé	Dommages élevés, dysfonctionnements
Côtière et estuarienne	Lente	De quelques cm à plus d'1 m	Faible	Dommages élevés
Remontée de nappe phréatique	Lente	Quelques cm	Très faible	Augmentent avec le temps de submersion
Rupture d'ouvrage	Soudaine	Plusieurs m	Très élevé	Très élevés
Subite ou éclair	Soudaine	Plusieurs m	Très élevé	Très élevés

1.3 Notions de risque, d'aléa et de vulnérabilité

Le risque est aujourd'hui un concept familier, largement utilisé dans la littérature et dans les médias. Sa définition ne devrait donc, a priori, pas poser de problème majeur. Cependant, on constate que le « risque » et l' « aléa », qui sont des concepts étroitement liés mais pourtant différents, sont souvent confondus ou interchangés (Metzger *et al.*, 2011; Schneiderbauer *et al.*,

2004). De plus, la définition du concept de risque, ainsi que de ses composantes, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, diffère selon les domaines d'expertise (sécurité civile, ingénierie, assurances etc.), les études ou encore les auteurs (Dewan, 2013; Henry, 2004). Ils ne font ainsi pas l'objet d'un véritable consensus. Les concepts de risque, d'aléa et de vulnérabilité étant au centre de ces travaux de thèse, il est nécessaire de leur donner des définitions claires et précises, et adaptées au contexte de la sécurité civile.

La vulnérabilité – La vulnérabilité « fait référence à la prédisposition des éléments exposés à l'aléa, tels que les êtres humains, leur moyens de subsistance et leurs richesses, à subir des effets négatifs lorsqu'ils sont impactés par un aléa. La vulnérabilité est liée à la prédisposition, aux susceptibilités, aux fragilités, aux faiblesses, aux déficiences ainsi qu'au manque de capacité qui favorisent les effets adverses sur les éléments exposés » (page 69, Cordonna *et al.*, 2012). Cette prédisposition est influencée par des facteurs sociaux, économiques, environnementaux, physiques ou encore politiques, qui déterminent également la capacité des êtres humains à faire face à cet aléa (résilience) (Brooks *et al.*, 2005; Morin, 2008; Wisner *et al.*, 2004).

Le terme d'« **enjeux** », qui n'est pas considéré de manière systématique comme une composante du risque, et auquel on préfère parfois le terme d'« éléments à risque », peut se définir comme les éléments (personnes, biens, activités, patrimoine, etc.) susceptibles d'être affectés de manière directe comme indirecte par un aléa (Griot *et al.*, 2002) (Figure 1.3). Ce terme est parfois confondu avec celui de « vulnérabilité ».

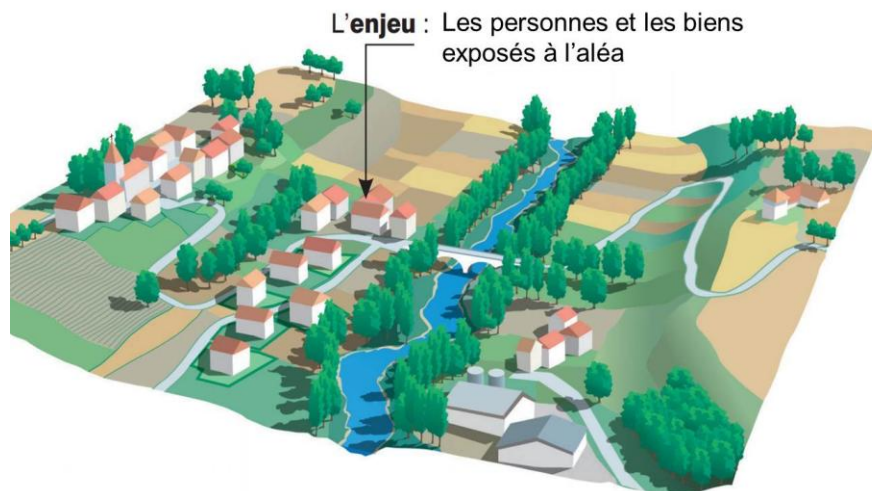


Figure 1.3: Représentation des enjeux (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015)

L'aléa - L'aléa (Figure 1.4) est un phénomène pouvant potentiellement causer des pertes en vies humaine, des blessures à la population, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou encore une dégradation de l'environnement. Il peut être d'origine naturelle (ex : séisme, inondation), technologique (ex : marée noire, fuite radioactive) ou encore humaine (ex : guerre, émeutes) (Godschalk, 1991). Un aléa se caractérise par sa localisation, sa durée, son intensité ou encore sa fréquence (Morin, 2008; Schneiderbauer *et al.*, 2004)

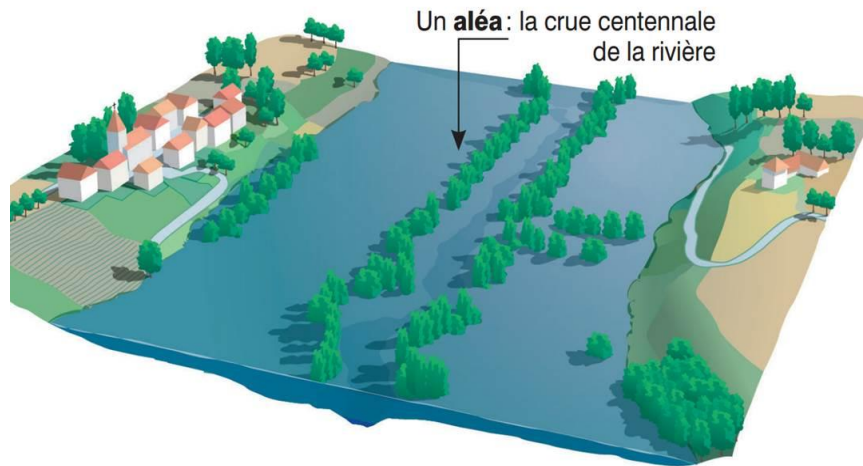


Figure 1.4: Représentation de l'aléa (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015)

Le risque - Le risque peut être défini comme « les conséquences éventuelles et incertaines d'un évènement sur quelque chose ayant une valeur, compte dûment tenu de la diversité des valeurs. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'évènements dangereux, que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes lorsqu'ils se produisent. Le risque découle des interactions de la vulnérabilité, de l'exposition et d'un aléa » (Figure 1.5) (page 5, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2014a). Ainsi, on peut considérer qu'une inondation, même majeure, touchant une zone inhabitée et non exploitée par la population ne constitue pas un risque, puisqu'aucun enjeu vulnérable n'est exposé à l'aléa.

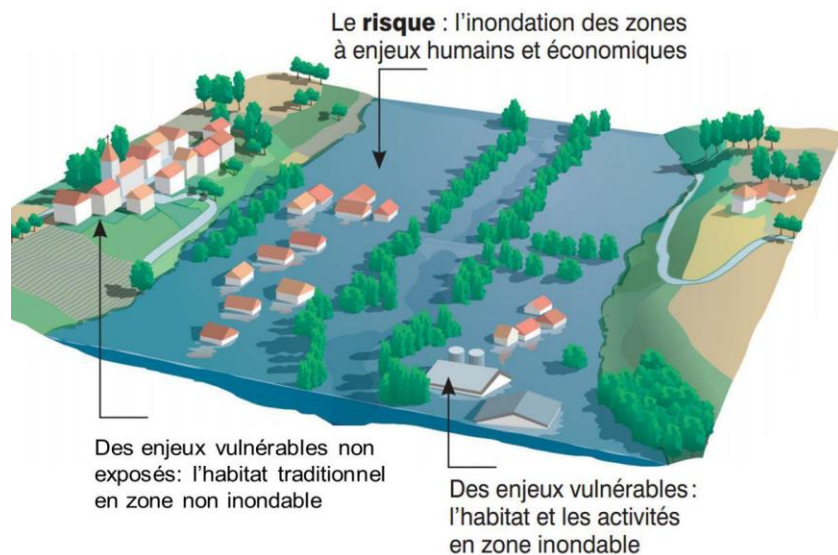


Figure 1.5: Représentation du risque (tirée de Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 2015)

1.4 Les différentes phases de la gestion du risque d'inondation

L'augmentation importante des sinistres d'origines naturelle et anthropique, et des dommages humains et économiques qui en découlent, ont poussé depuis une quarantaine d'années les pays à se doter de stratégies de gestion des risques complètes et élaborées. Ces stratégies, qui ont beaucoup évolué depuis leurs débuts, se doivent de tenir compte de tous les types d'aléas pouvant affecter les zones auxquelles elles s'appliquent, et ne sont plus limitées uniquement au développement de plans d'urgence permettant de faire face à certains aléas ou catégories d'aléas. Elles intègrent ainsi d'autres phases importantes de la gestion des risques, comme leur prévention ou la reconstruction après un sinistre (Henry, 2004).

Dans de nombreux pays, la conception du domaine de la gestion des risques s'est largement inspirée du « Comprehensive Emergency Management », développé et proposé pour la première fois en 1979 par la National Governors Associations, aux États-Unis. Ce document, qui a depuis grandement évolué, propose des lignes directrices pour la préparation et la gestion de différents types de situations d'urgence, telles que les catastrophes naturelles et anthropiques, le manque de ressources essentielles, les soulèvements de populations civiles ou encore les attaques terroristes. Le processus de gestion des risques y est divisé en quatre phases interdépendantes, à savoir 1) la prévention et l'atténuation; 2) la préparation; 3) l'intervention; et

4) le rétablissement, tel qu'illustré dans la Figure 1.6. Ces quatre phases, qui seront détaillées par la suite, constituent aujourd'hui ce qui est désigné sous le terme des quatre « dimensions de la sécurité publique » par Sécurité Publique Canada (SPC) et par le ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSP). Malgré sa large utilisation, cette catégorisation de la gestion des risques peut varier significativement d'un pays à l'autre. A titre d'exemple, en France, seules trois phases sont prises en compte : la préparation et la prévention; la gestion de crise et finalement la reconstruction (Henry, 2004). Aux États-Unis, une tendance récente veut également que les phases de prévention et d'atténuation soient divisées, créant ainsi une cinquième dimension de la gestion de crise.

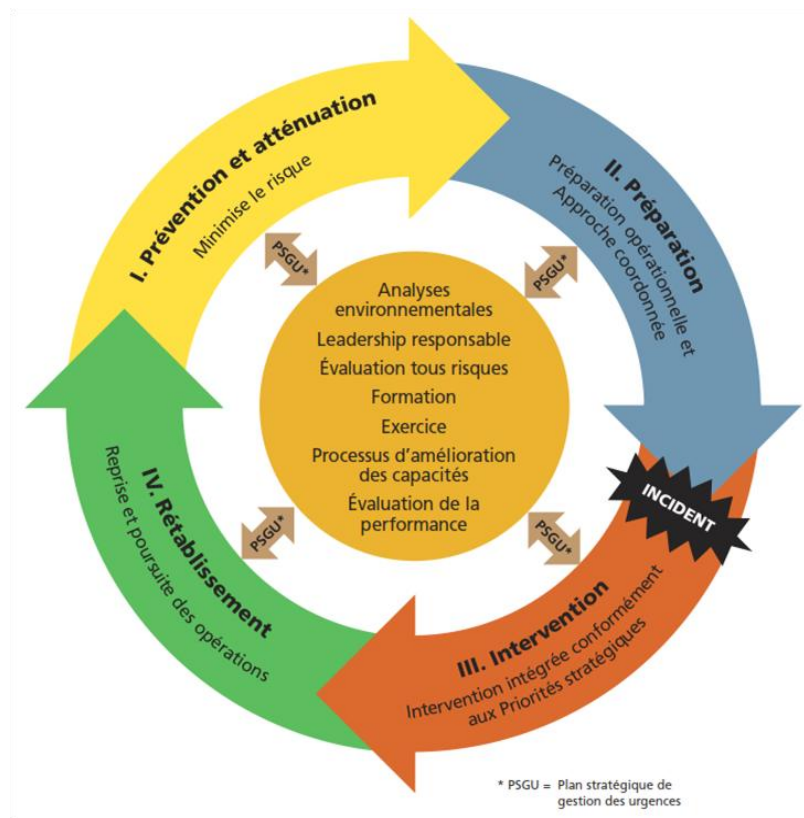


Figure 1.6: Continuum de la gestion des urgences au Canada (tirée de Sécurité Publique Canada, 2010)

Chacune de ces dimensions de la gestion du risque fait l'objet de mesures précises, appliquées par des acteurs spécifiques à différentes échelles. Au Canada et au Québec, le cadre stratégique de la gestion des risques s'aligne largement sur les pratiques proposées par

l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) (famille de normes ISO 31000 dont par exemple la norme ISO 31000 :2009, Management du risque; complétée par la norme ISO/IEC 31010 :2009, Gestion des risques-Techniques d'évaluation des risques et par le Guide ISO 73 :2009- Management du risque) mais aussi par le contenu d'une norme australienne et néo-zélandaise, la norme AS/NZS 4360 : Gestion des Risques, présentée pour la première fois en 1999 et depuis régulièrement mise à jour.

Selon le MSP (Morin, 2008), ces différentes dimensions de la sécurité civile peuvent se définir comme suit :

La prévention et l'atténuation - La prévention et l'atténuation ont pour objectif d'agir en amont des sinistres afin d'en réduire les conséquences potentielles sur les populations et sur les infrastructures. Elles se définissent comme « l'ensemble des mesures permanentes ayant pour objectifs d'éliminer les risques, de réduire les probabilités d'occurrence des aléas ou encore d'atténuer leurs effets potentiels » (*page 28*). Elles impliquent donc la connaissance des aléas pouvant toucher un milieu donné, mais aussi des vulnérabilités de ce milieu (vulnérabilité sociale, structurelle, etc.). Les actions de prévention et d'atténuation couvrent ainsi un large éventail de mesures telles que la mise en place de dispositions légales, réglementaires et normatives visant la réduction des risques, la prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, le relogement des personnes ou le déplacement des biens exposés mais aussi la communication au public et sa sensibilisation aux risques (*page 38*).

La préparation - La préparation se définit comme « l'ensemble des activités et des mesures destinées à préparer et à renforcer la capacité de réponse au sinistre des collectivités ou des organisations » (*page 32*). Elle vise ainsi à « réduire l'incertitude et l'improvisation lors des sinistres, par l'anticipation des problèmes et l'évaluation de solutions adéquates avant la manifestation de l'aléa » (*page 33*). La préparation doit ainsi « s'intégrer à la gestion courante des organisations publiques et privées, afin d'être prise en compte dans les décisions et les actions qui touchent les différents domaines d'activités exposés à un aléa » (*page 32*). Elle intègre ainsi des mesures telles que la mise en place de modalités administratives et logistiques, de programmes de formation en matière de préparation, de programmes d'exercices, de préparation de la population, etc. (*page 33*).

L'intervention - L'intervention représente « l'ensemble des mesures prises immédiatement avant, pendant ou immédiatement après un sinistre pour protéger les personnes, assurer leurs besoins essentiels et sauvegarder les biens, les services et l'environnement » (*page 34*). Les moyens et les actions planifiés durant l'étape de préparation sont ainsi appliqués et adaptés

selon la nature et l'ampleur du sinistre, et les besoins qui en découlent. Cette fonction de la gestion du risque se caractérise par une contrainte temporelle forte, les mesures d'intervention devant être mises en place durant les minutes ou les heures suivant le début du sinistre afin d'être efficaces. L'intervention correspond entre autres à l'activation des structures et des modalités d'organisation de la réponse au sinistre, au déploiement des secours à la population, à la mise en place de dispositions visant au maintien des services et des opérations essentiels ou encore à la diffusion d'information publique sur la situation en cours (page 35).

Le rétablissement – Le rétablissement se définit comme « l'ensemble des décisions et des actions prises à court ou à long terme à la suite d'un sinistre, et visant à restaurer les conditions sociales, économiques, physiques et environnementales du milieu touché, et cela dans un contexte sécuritaire ». Le rétablissement vise ainsi à long terme à reconstruire le milieu. Il peut ainsi s'agir de « répondre aux conséquences du sinistre, telles que l'atteinte physique et psychologique à la population, l'atteinte aux infrastructures essentielles, les pertes financières et matérielles, etc. » (page 36). La démarcation temporelle entre cette fonction et la fonction d'intervention n'est pas toujours claire, le passage de l'une à l'autre s'effectuant généralement de manière graduelle après un sinistre (page 36).

1.5 Problématique

Il a été souligné dans la section précédente que le développement puis l'adoption de stratégies de gestion des risques par les municipalités et les organismes gouvernementaux vise à mitiger les aléas pouvant causer un sinistre, à améliorer la résilience des enjeux humains, économiques et environnementaux qui y sont exposés et, le cas échéant, à répondre au mieux en cas de sinistre. Cependant, si d'importantes mesures de préparation, de prévention et d'atténuation sont entreprises dans le cadre de ces stratégies, une protection totale contre l'aléa inondation ou encore la suppression de l'ensemble des enjeux vulnérables en zone inondable ne sont pas possibles (Kubal *et al.*, 2009; Schanze, 2006). Ainsi, le risque demeure, et l'intervention, qui vise à porter assistance aux personnes, à assurer leurs besoins essentiels et à protéger au mieux les biens, les services et l'environnement, reste une des phases les plus sensibles de la gestion des risques.

Il a également été souligné que durant la phase d'intervention, les moyens et les actions planifiés au cours de l'étape de préparation doivent être adaptés à l'ampleur du sinistre et aux

besoins qui en découlent, et être mis en place le plus rapidement possible après le début de l'évènement. Dans le cas d'une inondation touchant une zone habitée, il convient ainsi de localiser dans les plus brefs délais les zones touchées par l'inondation et de disposer d'une estimation des hauteurs d'eau dans ces zones, mais aussi de savoir quelles sont les vulnérabilités des communautés et des infrastructures qui y sont exposées. Ces informations sont indispensables pour évaluer au mieux le niveau de risque pour les individus présents dans la zone et ainsi établir les conséquences humaines de l'inondation en cours. Les services de sécurité civile vont ainsi pouvoir cibler les populations ayant un besoin prioritaire d'assistance et déterminer les actions nécessaires dans la zone inondée (évacuation par canot ou par hélicoptère, aide à la protection des bâtiments, etc.). Ils pourront également alerter et mobiliser les intervenants concernés par la situation, mobiliser le matériel adéquat et plus largement mettre en place le dispositif opérationnel adapté à la situation (centre de coordination municipal, centre de services aux personnes inondées, service de renseignement à la population, réseaux de télécommunication, etc.) (André *et al.*, 2002; Pitt, 2008; Ministère de la Sécurité Publique, 2008).

L'information sur le niveau de risque devrait être visualisable sous la forme d'une carte (Marco, 1994; Merz *et al.*, 2007), idéalement issue d'un système d'information géographique (SIG). Ce SIG doit permettre de mettre en relation les caractéristiques de l'aléa (étendue, hauteurs d'eau) et les caractéristiques des enjeux vulnérables qui y sont exposés, afin de fournir une évaluation spatialisée du risque (Hubbard *et al.*, 2014). Ce niveau de risque doit être mis à jour régulièrement, selon l'évolution de l'étendue de l'inondation et des hauteurs d'eau dans les zones touchées (Dewan, 2013; Krishnamurthy *et al.*, 2012; Mallinis *et al.*, 2011; Nico *et al.*, 2000; Pitt, 2008). Une échelle d'analyse fine, comme celle du bâtiment, devrait être privilégiée afin d'obtenir une évaluation précise du niveau de risque pour la population (Dellepiane *et al.*, 2000; Merz *et al.*, 2007). Enfin, la carte d'évaluation du risque se doit d'être facile de lecture (codes couleurs simples et significatifs), pour permettre une interprétation rapide du niveau de risque et de ses conséquences en termes humains mais aussi opérationnels par l'ensemble des services impliqués dans la gestion de crise (Sanyal *et al.*, 2004).

Des organismes internationaux comme l'Organisation des Nations Unies et l'Organisation Météorologique Mondiale, et en particulier son Programme Associé sur la Gestion des Crues, ont clairement identifié les différents enjeux liés au risque d'inondation et ont présenté un grand nombre de recommandations portant aussi bien sur le développement de stratégies de réduction de ces risques que sur leur cartographie (Jha *et al.*, 2012; Programme Associé sur la

Gestion des Crues, 2009; Programme des Nations Unies pour le Développement, 2004). Cependant, aucun outil ni aucune méthode spécifique n'a à ce jour été formellement recommandé par ces organismes pour évaluer et cartographier les risques humains liés aux inondations. Cela peut se justifier par le fait que la disponibilité des ressources et des données nécessaires à l'implémentation et à l'utilisation opérationnelle d'un tel outil n'est pas garantie, et de loin, dans tous les pays faisant face au risque d'inondation.

Ainsi, sous la pression de phénomènes d'inondations de plus en plus fréquents et intenses, et grâce au développement des techniques de géomatique, les outils permettant la production de cartes d'évaluation des risques liés aux inondations, développés par des institutions gouvernementales mais aussi par des organismes de recherche, se sont multipliés depuis le début des années 2000 (Dewan, 2013). Cependant, et comme souligné récemment par Koks *et al.* (2015b), les outils développés à ce jour ont souvent pour objectif de fournir une évaluation des dommages économiques et structurels engendrés par un phénomène d'inondation, le plus souvent à l'aide de fonctions de dommages adaptées à la vulnérabilité physique de la zone étudiée (voir par exemple Blin *et al.*, 2005; Jongman *et al.*, 2012; Schröter *et al.*, 2014; Thieken *et al.*, 2008; ou encore Koks *et al.*, 2015a). Ces outils sont avant tout destinés aux assureurs et aux aménageurs, et n'ont qu'un intérêt limité en phase d'intervention. A l'inverse, les outils permettant une évaluation du niveau de risque humain lié aux inondations sont plus rares (Dewals *et al.*, 2011; Dewan, 2013; Müller *et al.*, 2011; Ramsbottom *et al.*, 2003). Ils présentent de plus certaines insuffisances importantes, autant sur l'aspect de la cartographie de l'aléa inondation que sur celui de l'évaluation de la vulnérabilité de la population face aux inondations. Ces insuffisances ne leur permettent pas, à notre sens, d'être utilisés de manière opérationnelle, en support au déploiement des ressources engagées lors de la phase d'intervention.

1.5.1 Limites des approches de cartographie des zones inondées

Les outils d'évaluation du risque humain lié aux inondations développés à ce jour utilisent différents outils pour cartographier l'aléa et définir certaines de ses caractéristiques, à savoir son étendue, les hauteurs d'eau dans les zones touchées et dans certains cas la vitesse des flots. Les modèles hydrauliques à 2 dimensions et à 3 dimensions ont été mis à profit dans quelques études pour obtenir une cartographie des zones inondées et des hauteurs de submersion (Aboelata *et al.*, 2003; HR Wallingford, 2005; Jonkman *et al.*, 2008; Lombroso *et al.*, 2016; Porter *et al.*, 2010). D'autres ont préféré utiliser les limites des plaines inondables de différentes récurrences (ex : 20 ans, 100 ans), générées à l'aide de modèles hydrauliques, pour définir les

zones les plus exposées à l'aléa (Chakraborty *et al.*, 2005; Hebb *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2007). Certaines études ont également choisi de mettre à profit des données relatives à des événements d'inondations passés enregistrés dans la zone d'étude (ex : hauteurs d'eau mesurées à différents endroits de la zone inondées, limites maximales des zones inondées lors d'un événement majeur, etc.). D'autres encore se basent sur les caractéristiques de cette zone (ex : présence ou absence de digue, distance à la rivière, élévation de la zone par rapport au niveau moyen de la mer ou de la rivière, etc.) pour estimer puis cartographier les caractéristiques de l'aléa inondation (Koks *et al.*, 2015b; Wang *et al.*, 2011).

Cependant, les données issues de la télédétection radar se présentent aujourd'hui comme un des outils les plus adaptés pour la cartographie des zones inondées dans un contexte de gestion de crise (Dewan *et al.*, 2006; Horritt *et al.*, 2003; Matgen *et al.*, 2007a; Schumann *et al.*, 2011). Grâce à leur vue synoptique, mais néanmoins détaillée, et à leur capacité d'acquérir des données quelles que soient les conditions de nébulosité, les capteurs radar satellitaires offrent la possibilité d'obtenir une vue précise de l'ensemble des zones touchées par l'inondation à l'aide d'une seule image, et cela même durant les phases actives de la crue, alors que le couvert nuageux est généralement dense (Horritt *et al.*, 2001; Pulvirenti *et al.*, 2013a; Pulvirenti *et al.*, 2014; Schumann *et al.*, 2012). Elles présentent de plus l'avantage de fournir une vue de la situation en cours, et pas une simulation de cette situation. Une revue détaillée des avantages de la télédétection radar par rapport aux autres outils disponibles pour la cartographie des zones inondées dans un contexte d'intervention sera présentée dans la section 2.2 de ce document.

Au cours des trente dernières années, de nombreuses études se sont intéressées à la détection des zones inondées en eau libre et des zones végétales et boisées inondées, et ont abouti au développement de méthodes permettant une détection précise de ces zones (Henderson *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2004; Smith, 1997). A l'inverse, la détection par imagerie radar des zones urbaines inondées, qui sont les zones regroupant le plus d'enjeux humains et économiques, n'a été l'objet d'études que récemment et ne s'est véritablement développée que depuis 2007. Ce développement est en très grande partie dû à la disponibilité d'images d'inondations urbaines acquises par la nouvelle génération de capteurs radar de très haute résolution spatiale (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, etc.), qui permettent des analyses à l'échelle intra-urbaine.

Plusieurs algorithmes de détection des zones inondées en milieu urbain ont ainsi été proposés, avec l'objectif commun de fournir des outils de cartographie opérationnels dans un contexte de gestion de crise (Giustarini *et al.*, 2013; Martinis *et al.*, 2009; Mason *et al.*, 2012b; Matgen *et al.*,

2011; Pulvirenti *et al.*, 2011b). Cela implique bien sûr que la détection des zones inondées soit précise dans l'ensemble des zones urbaines touchées, que les temps de traitement soient courts, mais aussi que l'algorithme développé soit automatique ou aisément automatisable, pour ne pas avoir à ajuster ses paramètres à chaque scénario d'inondation (Hahmann *et al.*, 2008). Enfin, et c'est un point particulièrement important, les données radar et éventuellement les données auxiliaires requises par l'algorithme doivent être facilement disponibles, et cela pour un grand nombre de zones urbaines exposées à l'aléa, afin que l'algorithme soit aisément transposable à d'autres scénarios d'inondation (Giustarini *et al.*, 2013). Or, si les algorithmes développés récemment sont généralement automatisés et produisent dans la plupart des cas des résultats dans des temps inférieurs à une heure, tous les critères permettant leur utilisation opérationnelle ne sont pas remplis.

Tout d'abord, ces algorithmes requièrent de manière presque systématique l'intégration de données auxiliaires, dont l'utilisation a pour but de réduire les erreurs de classification induites par la présence de zones ayant une rétrodiffusion de type spéculaire permanente (routes, stationnements, etc.), mais aussi par les phénomènes d'ombres et de déversements (Soergel *et al.*, 2003). Les données d'occupation du sol et les modèles électromagnétiques utilisés par Pulvirenti *et al.* (2011a), Pulvirenti *et al.* (2013a) ou encore Pierdicca *et al.* (2013) pour l'interprétation des changements de signature radar dus à la présence d'eau sur différents types de surface, sont généralement aisément disponibles et ne limitent ainsi pas l'application de la méthode à un petit nombre de sites d'études. A l'inverse, la disponibilité des modèles digitaux de surface générés à partir de données LIDAR de très haute résolution spatiale, requis par les algorithmes proposés par Mason *et al.* (2011) et par Mason *et al.* (2012a) pour localiser des zones urbaines affectées par les phénomènes d'ombres et de déversement à l'aide d'un simulateur SAR, n'est pas garantie pour toutes les zones urbaines exposées à l'aléa inondation, ce type de données étant particulièrement coûteuses. De la même manière, les images radar satellitaires dites de « référence » proposées par Matgen *et al.* (2011) et par Giustarini *et al.* (2013) doivent être acquises avec des paramètres d'acquisition et un développement de la végétation identiques à ceux de l'image radar d'inondation, pour ne pas engendrer d'erreurs de détection. Or, les auteurs eux-mêmes soulignent que la probabilité de trouver une image adéquate remplissant ces critères peut être faible, en particulier dans le cas des capteurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) récents, même si les archives d'images s'enrichissent chaque année.

Dans plusieurs études, l'utilisation de données auxiliaires a pour objectif de détecter les zones d'ombres et de déversement, ainsi que les surfaces artificielles ayant une réflexion de type spéculaire, dans le but de les masquer durant le processus de détection des zones urbaines inondées. Si l'utilisation de tels masques permet de limiter les erreurs de détection de l'algorithme, elle a également pour effet de laisser inconnu l'état d'inondation dans les zones masquées. Or, ces zones peuvent concerner une partie non négligeable de la superficie totale de la zone urbaine : dans les travaux présentés par Mason *et al.* (2010), elles représentent jusqu'à 20% de la superficie totale de la zone urbaine, alors que dans Giustarini *et al.* (2013), elles en représentent près de 39%. Ainsi, Mason *et al.* (2012a), dont l'étude présente à ce jour des résultats parmi les meilleurs, soulignent que si 75% des pixels urbains inondés ont été bien classifiés à l'aide de l'algorithme proposé (avec un taux de faux positifs de 24%), ce pourcentage chute à 57% (avec un taux de faux positif de 18%) si l'ensemble des pixels de l'image radar sont pris en compte par l'algorithme, ce qui inclut les pixels affectés par les phénomènes d'ombre et de déversement.

Enfin, il est intéressant de souligner que des considérations hydrauliques simples ont été utilisées dans plusieurs algorithmes pour guider la détection des pixels inondés en milieu urbain et rural (Mason *et al.*, 2012b; Pierdicca *et al.*, 2008; Pulvirenti *et al.*, 2011b). Ces considérations sont intégrées à l'algorithme par l'intermédiaire de modèles numériques de terrain (MNT), dont des informations d'altitude, de pente ou encore de proximité sont extraites. Si les données d'élévation ont l'avantage d'être disponibles pour un très grand nombre de rivières et permettent une amélioration sensible de la cartographie des zones inondées, seules des considérations hydrauliques simples peuvent en être extraites. Les exemples d'intégration de données à caractère hydraulique explicite dans des algorithmes de détection des zones inondées à l'aide de l'imagerie radar sont rares, et n'ont, à notre sens, pas fait l'objet de publications scientifiques. Or, ces données, qui fournissent des informations sur les caractéristiques hydrauliques d'une plaine inondable et sur les caractéristiques spatiales et temporelles des inondations d'une rivière, pourraient être une source d'information précieuse dans les secteurs où la détection des zones inondées à l'aide de l'imagerie radar reste difficile. L'intégration de telles données dans une méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées basée sur l'imagerie radar pourrait donc être particulièrement pertinente.

1.5.2 Limites des approches d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations

Au cours des vingt dernières années, des efforts importants ont été réalisés dans le domaine de la vulnérabilité humaine aux inondations, dans le but de mieux comprendre les facteurs influençant cette composante du risque (Birkmann, 2006; Scheuer *et al.*, 2011; Vári *et al.*, 2013). Ces efforts ont abouti au développement d'un grand nombre d'approches d'évaluation de la vulnérabilité humaine, permettant d'identifier les facteurs sociaux, économiques ou encore politiques influençant la vulnérabilité humaine face aux inondations et gouvernant ses tendances spatiales et temporelles (Balica *et al.*, 2009; Connor *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2013; Fekete, 2009; Sebald, 2010; Tate, 2012).

Ces approches constituent des bases de réflexion solides pour la définition et l'application de stratégies de gestion des risques humains liés aux inondations. Cependant, elles s'orientent pour la plupart vers la phase de prévention et d'atténuation du risque, voire vers la phase de préparation. Elles permettent ainsi de cibler les zones où le développement de mesures de gestion des risques liés aux inondations et d'adaptation est nécessaire, et d'adapter ces mesures aux caractéristiques et aux besoins de la population.

Les approches d'évaluation de la vulnérabilité adaptées à la phase d'intervention, qui permettent aux responsables des mesures d'urgence de cibler les populations ayant un besoin prioritaire d'assistance au cours de l'inondation et ainsi de rendre l'intervention plus efficace, sont en revanche beaucoup moins nombreuses. De plus, l'analyse de ces quelques approches a révélé certaines insuffisances, qui ne leur permettent pas, à notre sens, de fournir aux responsables de la sécurité civile une information précise sur les individus ayant un besoin prioritaire d'assistance au cours d'une inondation. Leur mise à profit dans un outil opérationnel d'évaluation en temps quasi-réel du risque lié à un événement d'inondation en cours n'est pas entièrement pertinente.

Une des limites majeures d'un nombre important d'approches produisant des informations utiles à l'organisation de la gestion de crise est qu'elles n'intègrent pas un des facteurs déterminants du risque humain lié aux inondations, à savoir la vulnérabilité socio-économique de la population. Elles préfèrent ainsi se concentrer sur des aspects tels que l'exposition de la population au sein des bâtiments, les effets des alertes et de leur dissémination sur le comportement de la population, la capacité et la fonctionnalité des routes lors de l'inondation, etc. (voir par exemple les travaux de Bandana *et al.*, 2008; Prasad, 2012; ou encore Simonovic *et al.*, 2005). A l'inverse, les quelques approches cherchant à produire une évaluation des

besoins d'assistance à la population et intégrant la vulnérabilité socio-économique de la population à leur évaluation ont pour désavantage majeur de se limiter à ce seul aspect (voir par exemple les approches développées par Chakraborty *et al.*, 2005; Penning-Rowsell *et al.*, 2005 et Prasad, 2016). D'autres aspects déterminants du risque lié à une inondation en cours, tels que l'exposition de la population, l'état des routes permettant d'évacuer ou encore l'effet des systèmes d'alerte, sont ainsi exclus des analyses. Ces approches diffèrent ainsi peu des méthodes orientées vers les phases de prévention et d'atténuation, ou encore de préparation, de la gestion du risque.

Un des rares modèles opérationnel intégrant la plupart de ces aspects est, à notre connaissance, le modèle « Flood Risk to People », développé par le Département de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires Rurales du gouvernement britannique (Ramsbottom *et al.*, 2003). Ce modèle permet d'estimer le nombre de personnes exposées à l'aléa ainsi que le nombre d'individus blessés ou tués dans les zones affectées par l'inondation. Pour cela, 4 facteurs sont utilisés : le nombre d'individus dans la zone, le niveau de l'aléa, la vulnérabilité de la zone, et la vulnérabilité de la population présente dans cette zone. Une des limites importantes de ce modèle est que les caractéristiques de l'aléa (hauteur d'eau, vitesse des flots, présence de débris) sont définies par zones de récurrence d'inondation ou par distance à la rivière, ce qui induit une certaine généralisation de l'exposition à l'aléa (définie comme la vulnérabilité de la zone) à l'intérieur de ces zones. De plus, les estimations du nombre de personnes blessées, tuées, etc. ne peuvent être extraites que par cellule d'1 km par 1 km. Cette approche ne permet ainsi pas de localiser avec précision les individus ayant des besoins prioritaires d'assistance.

Nous remarquons que le manque de ressources essentielles pour la population (ex : réseaux de communication, eau potable, électricité, etc.) n'est que très rarement considéré. Seuls les réseaux routiers sont fréquemment intégrés aux approches d'évaluation de la vulnérabilité et du risque, et cela en grande partie pour définir les possibilités d'évacuation par la route de la population. Or, dans un rapport présentant les enseignements pouvant être tirés des inondations dramatiques qui ont touché certaines régions d'Angleterre en 2007, Pitt (2008) souligne l'importance de tenir compte du manque de certaines ressources essentielles (eau potable, électricité, réseaux de transport et de communication, etc.) sur la vulnérabilité de la population au cours de la crise. Ils insistent ainsi sur le fait que l'absence d'accès à certaines ressources essentielles, par la défaillance ou la destruction des infrastructures qui produisent ces ressources, tend à renforcer la vulnérabilité des individus moins vulnérables face aux

inondations. Les impacts du manque prolongé de certaines ressources essentielles sur la santé et la sécurité de la population s'accroissent également avec le temps. Il conviendrait donc d'identifier les ressources essentielles dont le manque au cours de l'inondation a un impact sur la vulnérabilité de la population, et d'évaluer cet impact.

D'autre part, dans de très nombreuses approches, l'exposition de la population à l'aléa inondation est intégrée à l'analyse de la vulnérabilité par l'intermédiaire d'un zonage relatif à certaines caractéristiques de l'aléa. Par exemple, Birkmann (2007) et Chakraborty *et al.* (2005) estiment l'exposition de la population à l'aide de l'emprise spatiale d'évènements d'inondation de périodes de retour données. Dewan (2013) propose également d'estimer l'exposition de la population par l'intermédiaire d'une combinaison du zonage des fréquences d'inondation et d'un zonage des hauteurs d'eau maximales dans ces zones, dérivées d'un modèle numérique d'élévation.

Ces différentes approches considèrent donc que tous les individus présents dans une même zone sont exposés de la même manière à l'aléa inondation. Elles ne permettent ainsi pas d'évaluer précisément l'exposition à l'aléa à l'échelle du bâtiment ou du foyer. Quelques rares études considèrent cependant que l'exposition de la population à l'aléa inondation peut être évaluée par l'intermédiaire des caractéristiques des bâtiments dans lesquels la population peut se trouver au cours de l'inondation (Müller *et al.*, 2011; Ramsbottom *et al.*, 2003; Schneiderbauer, 2007). En particulier, la position du plancher d'habitation par rapport au niveau de la route, la disponibilité de mesures de protection au niveau du bâtiment, le nombre d'étages et les matériaux de construction semblent être des indicateurs pertinents pour évaluer l'exposition des individus à l'échelle du foyer ou du bâtiment. Cependant, ils n'ont pour le moment été utilisés que dans des approches d'évaluation des dommages économiques liés aux inondations à l'échelle du foyer, et dans des approches d'estimation des décès ou du nombre de blessés suite à des inondations éclair. La pertinence, mais aussi la faisabilité de l'intégration de ces indicateurs dans une approche d'évaluation du risque humain lié à une inondation en cours et orientée vers la définition des besoins d'assistance à la population, n'ont donc jamais été démontrées.

1.6 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette étude est de combler les limites actuelles des outils d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours en milieu urbain et rural, et dont la finalité est de venir en soutien à la prise de décision lors de la phase d'intervention au cours d'une inondation.

Suivant les différents éléments soulignés dans les sections précédentes de ce document, trois volets sont considérés pour atteindre cet objectif.

Premier volet : Il s'agit de combler les limites actuelles des méthodes de caractérisation d'une inondation en cours (étendue des zones urbaines et rurales inondées et hauteurs d'eau en tout point de ces zones) utilisant l'imagerie radar satellitaire.

On considèrera pour cela le développement des méthodes suivantes :

- a) Développement d'une méthode permettant la délimitation des zones inondées en eau libre sur une image RSO de très haute résolution spatiale, acquise en bande C et en polarisation HH.
- b) Validation de la pertinence de l'intégration de données à caractère hydraulique, à savoir des intervalles de récurrence d'inondation estimés en tout point de la plaine inondable, à la méthodologie de cartographie des zones urbaines et rurales inondées.
- c) Développement d'une approche d'estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées, basée sur la cartographie des zones urbaines et rurales inondées précédemment développée.

Second volet : Il s'agit de combler les limites actuelles des méthodes d'évaluation, puis de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain à une inondation en cours, à l'échelle du bâtiment.

On considèrera pour cela les étapes suivantes :

- a) Identification des indicateurs de vulnérabilité sociale et économique permettant une évaluation pertinente de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation, et intégration de ces indicateurs à une méthode opérationnelle d'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de données déjà existantes et aisément accessibles.

- b) Identification des ressources essentielles dont le manque au cours d'une inondation peut avoir des conséquences sur la santé et la sécurité de la population, et intégration de ces aspects à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation.
- c) Développement d'indicateurs d'exposition de la population à l'aléa inondation à l'échelle du bâtiment, et intégration de cet aspect à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation.
- d) Définition d'une méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours à l'échelle du bâtiment, intégrant l'ensemble des composantes de la vulnérabilité humaine précédemment identifiées et les caractéristiques de l'aléa en cours.

Troisième volet : Enfin, ce volet consiste en la démonstration de la pertinence de la méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours comme outil d'aide à la décision lors de la phase d'intervention, à l'aide d'un scénario d'inondation réel.

On considèrera pour cela les étapes suivantes :

- a) Application de la méthode proposée à un scénario d'inondation réel.
- b) Identification des avantages et des limites de l'outil dans le cadre d'une utilisation opérationnelle lors de la phase d'intervention.

1.7 Plan de la thèse

Ce premier chapitre a permis d'introduire le contexte dans lequel ces travaux de thèse se placent (1.1), ainsi que des notions de base relatives aux types d'inondation pouvant affecter les zones urbaines et péri-urbaines (1.2), au concept du risque (1.3) et à sa gestion (1.4). La problématique et les objectifs de recherche qui en découlent ont été présentés aux sections 1.5 et 1.6, respectivement.

Afin d'apporter une structure claire à ce document, il a été choisi de le diviser en deux parties. La première partie du document (Partie 1) se concentrera ainsi sur les travaux portant sur la caractérisation spatiale de l'aléa inondation. La seconde partie (Partie 2) portera sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité et du risque humain à une inondation en cours.

La première partie intègre les chapitres 2, 3 et 4. Le chapitre 2 résume la revue de littérature relative à la détection des zones inondées en milieux urbains et ruraux à l'aide de l'imagerie radar satellitaire. Il est organisé en trois sections. Le chapitre 3 se concentre quant à lui sur le développement de la méthode de caractérisation spatiale de l'aléa inondation. Enfin, le chapitre 4 s'intéresse spécifiquement aux résultats obtenus à l'aide des méthodes de cartographie des zones urbaines et rurales inondées et d'estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées.

La seconde partie de cette thèse (Partie 2) regroupe les chapitres 5, 6 et 7. Le chapitre 5 présente un état de l'art des approches d'estimation et de cartographie de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation. Le chapitre 6 porte sur le développement des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours. Il se divise en trois sections. Enfin, le chapitre 7 se concentre sur la présentation des résultats des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours, et cherche à illustrer la pertinence de l'outil développé pour l'aide à la prise de décision en phase d'intervention, à l'aide d'un scénario d'inondation réel.

Finalement, le chapitre 8 clôt ce document, en présentant les conclusions et les différentes perspectives qui en découlent.

PARTIE 1
CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION

2. ETAT DE L'ART DES APPROCHES DE CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION

Ce chapitre présente un état de l'art des approches de caractérisation spatiale de l'aléa inondation. Il est organisé en trois sections. La première (2.1) introduit le lecteur aux différents outils pouvant être mis à profit pour cartographier l'étendue des zones inondées, à savoir les relevés sur le terrain (2.1.1), la modélisation hydraulique (2.1.2), la télédétection optique (2.1.3) et la télédétection à micro-ondes passives (2.1.4) et actives (2.1.5). Nous insistons à chaque fois sur les avantages et les limites de chacun de ces outils, afin de justifier finalement l'utilisation de la télédétection à micro-ondes actives pour la détection des zones inondées lors d'une phase d'intervention. La seconde section (2.2) présente les interactions du signal radar émis par un capteur avec les différents types de surfaces inondées : les plans d'eau libre et des sols nus inondés (2.2.1), les surfaces d'eau en présence de vent (2.2.2), la végétation et les zones boisées inondées (2.2.3) et les zones urbaines inondées (2.2.4). Il s'agit ainsi d'identifier les éléments pouvant constituer des sources d'erreurs importantes lors des processus de détection de ces différentes surfaces inondées, mais aussi d'identifier les paramètres d'acquisition des systèmes radar permettant leur détection optimale. La troisième section (2.3) dresse un état de l'art des approches de cartographie des zones inondées à l'aide de l'imagerie RSO et des méthodes d'extraction des hauteurs de submersion. Étant donné l'abondance de la littérature sur ces sujets, cette troisième section comprend huit sous sections présentant chacune une approche de cartographie des zones inondées par imagerie RSO (2.3.1 à 2.3.8), ainsi qu'une sous-section traitant des différentes méthodes d'extraction des hauteurs de submersion rencontrées dans la littérature (2.3.9). Enfin, un sommaire (2.4) soulignera les aspects majeurs issus de cet état de l'art, qui orienteront les principaux choix méthodologiques permettant de répondre aux objectifs et aux sous-objectifs du premier volet de cette thèse.

2.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation

Différents outils et techniques, à savoir les relevés sur le terrain, la modélisation hydraulique et les différentes formes de télédétection (optique, à micro-ondes passives et à micro-ondes actives) peuvent être mis à profit pour cartographier l'étendue d'une inondation lorsqu'elle est en

cours et pour estimer les hauteurs de submersion dans les zones inondées. Cependant, malgré leurs avantages respectifs, certains de ces outils présentent des limites parfois importantes, qui les rendent peu compatibles avec les exigences qui sont celles de la phase d'intervention.

2.1.1 Les relevés sur le terrain

Les relevés directs sur le terrain constituent une méthode très répandue pour l'obtention des données nécessaires à l'étude d'un phénomène spatial et à la validation des résultats d'une méthode ou d'un modèle. Ces données, récoltées une à une sur le terrain, sont souvent considérées comme étant particulièrement fiables. Cependant, en situation d'inondation, l'accès aux zones inondées peut être problématique et le danger pour les personnes en charge des relevés peut être élevé. L'échantillonnage spatial réalisé sur le terrain est ainsi souvent peu élevé et mal distribué, ce qui ne permet pas d'obtenir des informations précises sur la localisation des zones inondées et sur les hauteurs de submersion dans ces zones (Hess *et al.*, 1990; Lang *et al.*, 2008; Townsend *et al.*, 1998). Enfin, et c'est là une limite majeure, les temps nécessaires à l'acquisition des données sur la zone, à leur traitement puis à la production de la carte des zones affectées par l'inondation et des hauteurs de submersion sont souvent trop longs pour que cette technique soit réellement utile en phase d'intervention. Lors d'une inondation, ce qu'on pourrait considérer comme des relevés sur le terrain se confond donc bien souvent avec l'action d'intervention elle-même.

2.1.2 La modélisation hydraulique

Les modèles hydrauliques d'inondation, et plus particulièrement les modèles en deux dimensions et en trois dimensions, sont très fréquemment employés pour la simulation numérique des crues hypothétiques ou réelles, pour leur compréhension, leur analyse et leur gestion (Hostache, 2006). Ces modèles permettent de simuler, pour un débit connu, l'étendue des zones inondées, les niveaux d'eau dans ces zones et dans certains cas les vitesses d'écoulement et les durées de submersion (Neal *et al.*, 2010). Si en milieu rural les écoulements de surface sont globalement gouvernés par la topographie naturelle du milieu et par la présence de végétation, les facteurs influençant les écoulements en milieu urbain sont plus nombreux (présence de bâtiments, de murs, de volumes de stockage, de véhicules dans les rues, d'un réseau souterrain d'évacuation des eaux, etc.) et rendent la dynamique des écoulements très complexe (Haider *et al.*, 2003; Mason *et al.*, 2010). Les effets sur les écoulements de surface de

chacun de ces facteurs doivent être identifiés et modélisés, puis intégrés à la modélisation hydraulique en deux ou trois dimensions à l'aide de données spécifiques. Ces données, qui vont servir à contraindre les conditions du modèle hydraulique, doivent bien sûr être les plus précises mais aussi les plus récentes possibles. Cela représente donc un volume très important de données, qu'il peut parfois être difficile de rassembler et dont le coût est potentiellement élevé.

Ainsi, en phase d'intervention, l'obtention rapide d'informations relatives à l'étendue de l'inondation et aux hauteurs de submersion dans une zone urbaine spécifique grâce à la modélisation hydraulique ne semble être envisageable que si un modèle hydraulique d'inondation a déjà été calibré pour cette zone, ou si l'ensemble des données nécessaire est déjà disponible. Il reste important de souligner que la modélisation hydraulique ne permet d'obtenir qu'une simulation des caractéristiques de l'inondation, pouvant de plus être teintée d'une part d'incertitude.

2.1.3 La télédétection optique

La télédétection regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques permettant de déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'une surface sans contact direct avec celle-ci, par la mesure et l'analyse du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par cette surface (Bonn *et al.*, 1996).

La télédétection optique opère dans les bandes du visible et du proche infrarouge, dans des longueurs d'ondes allant de 0,4 μm à 1,5 μm (Figure 2.1). Elle utilise le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les surfaces détectées, ce qui rend l'acquisition d'images dépendante des conditions d'illumination solaire. Dans le domaine de la télédétection optique, nous distinguerons ici les dispositifs aéroportés des dispositifs satellitaires.

La télédétection optique aéroportée permet d'obtenir des images de haute résolution spatiale d'une zone inondée, dont l'interprétation est relativement aisée. Elle est ainsi considérée comme une source de données fiable pour la cartographie de l'étendue des zones inondées (Mallinis *et al.*, 2011; Schumann *et al.*, 2009b). Cependant, l'utilisation d'images optiques aéroportées est souvent limitée par les coûts élevés de ce type de données et par le temps nécessaire à leur acquisition, en particulier quand l'inondation est étendue. Elle est donc restreinte à des zones inondées de petite à moyenne taille (Puech *et al.*, 2002). A cela peuvent s'ajouter des conditions météorologiques défavorables, qui empêchent le survol de la zone inondée, et les difficultés de détection des zones inondées sous un couvert végétal dense. Une forte nébulosité peut

éventuellement dégrader la qualité des images optiques aéroportées, mais les acquisitions se font généralement à très basse altitude, sous le couvert nuageux.

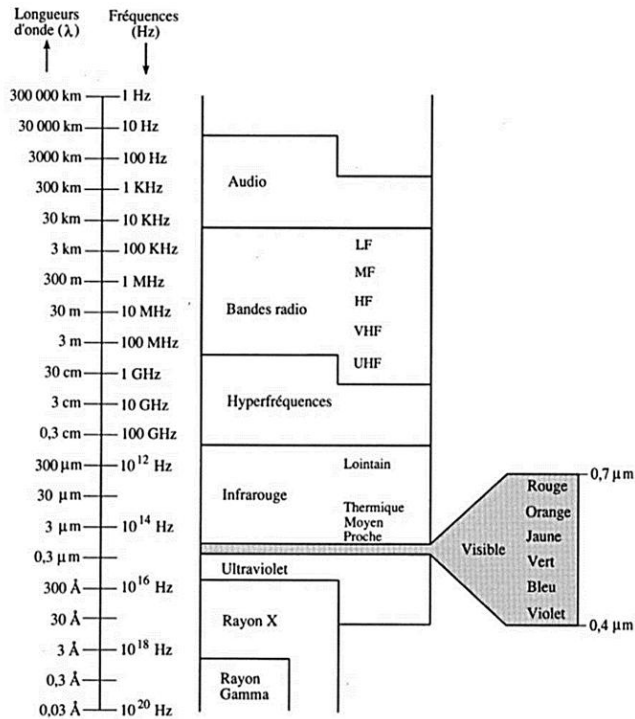


Figure 2.1: Le spectre électromagnétique (tirée de Bonn *et al.*, 1996)

Les capteurs optiques satellitaires ont permis d'améliorer l'accès aux données nécessaires à la cartographie des inondations à un coût relativement moins élevé que celui de la photographie aérienne (Brivio *et al.*, 2002). La très haute résolution spatiale (inférieure à 1 mètre) des capteurs lancés au cours de la dernière décennie, comme les satellites Pléiades 1A et 1B, GeoEye-1 ou encore la famille de satellites WorldView (1, 2 et 3), permet maintenant l'identification précise des zones inondées. C'est une avancée intéressante par rapport aux capteurs optiques plus anciens (1^{ère} et 2^{ème} générations de capteurs SPOT, premiers capteurs LANDSAT, etc.) dont la résolution spatiale est ou était de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres (Van der Sande *et al.*, 2003). Cependant, l'acquisition de données de qualité est souvent réduite par la présence d'un couvert nuageux important lors des inondations, les longueurs d'onde du visible et de l'infra-rouge ne pouvant pénétrer les nuages (Horritt *et al.*, 2003; Marti-Cardona *et*

al., 2010; Schumann *et al.*, 2011). L'imagerie optique satellitaire ne permet pas non plus de détecter les zones inondées sous un couvert végétal dense, ce qui exclut une partie de l'information recherchée dans certaines zones (Hess *et al.*, 1995; Sanyal *et al.*, 2004). La très haute résolution spatiale des données optiques se fait également au détriment de la largeur de fauchée. Il peut ainsi être nécessaire de programmer l'acquisition de plusieurs images pour couvrir l'intégralité de la zone inondée.

2.1.4 La télédétection à micro-ondes passives

Les capteurs satellitaires à micro-ondes passives – hyperfréquences allant de 1 GHz à 100 GHz (Figure 2.1) – tels que les capteurs AMSR-E (2002-2011) ou AMSR-2 (lancé en 2012), mesurent les radiations micro-ondes émises naturellement par la terre et l'atmosphère. Les radiations micro-ondes ont pour avantage d'être relativement peu sensibles à la diffusion atmosphérique, ce qui permet aux capteurs d'acquérir des images en conditions nuageuses (Smith, 1997). Ces instruments étant de plus très sensibles aux changements de constante diélectrique, les zones d'eau, dont la constante diélectrique est très élevée par rapport à celles des sols non inondés, peuvent être facilement détectables (Jin, 1999; Sippel *et al.*, 1998). La limite principale de ce type de capteur réside en leur très faible résolution spatiale. En effet, les hyperfréquences étant émises en faible quantité par la surface terrestre, il est nécessaire pour les radiomètres à micro-ondes passives d'intégrer les émissions d'une large zone avant de pouvoir enregistrer un signal. Ainsi, la faible résolution spatiale des images acquises – de l'ordre de 20 km à 100 km, selon les fréquences des capteurs – limite très fortement leur utilisation pour la détection précise des inondations au niveau local (Matgen *et al.*, 2011; Rees, 2011). Leur grande emprise spatiale (largeur de fauchée supérieure à 1000 km), de même que la haute résolution temporelle des capteurs (1 à 2 passages quotidiens), en font tout de même des capteurs satellitaires intéressants pour la détection et le suivi des zones inondées sur de grands territoires (De Groeve, 2010; Salvia *et al.*, 2011).

2.1.5 La télédétection à micro-ondes actives

Les capteurs à micro-ondes actives, aussi appelés capteurs radar, transmettent vers la surface un signal dans les hyperfréquences allant de 0,3 GHz à 100 GHz (Figure 2.1) et en détectent la partie rétrodiffusée par la surface et le délai de retour. Cette gamme d'hyperfréquences a été

divisée en bandes, désignées par des lettres. Le Tableau 2.1 présente les bandes les plus fréquemment utilisées en télédétection radar.

Tableau 2.1: Désignation des bandes radar et leurs limites en fréquences (tiré de Ulaby *et al.*, 2014)

Désignation	Limites en Fréquences (GHz)
P	0,225 - 0,39
L	0,39 – 1,55
S	1,55 – 4,20
C	4,20 – 5,75
X	5,75 - 10,9
Ku	10,9 – 22,00
Ka	22,00 – 36,00

L'imagerie RSO est la configuration à hyperfréquences actives la plus couramment utilisée. La synthèse d'ouverture est une technique qui s'applique aux systèmes radar à visée latérale, et permet de simuler une ouverture d'antenne très longue. La technologie de traitement du signal utilisée exploite, d'une part, le principe de compression d'impulsion, simulant ainsi une impulsion de signal très brève à partir d'une impulsion physique longue, pour augmenter la résolution en distance, et, d'autre part, la focalisation des échos Doppler d'une cible, qui permet d'améliorer la résolution géométrique sur la direction azimutale (Bonn *et al.*, 1996). Les capteurs RSO offrent ainsi une fine résolution spatiale (jusqu'à 1 m selon les capteurs), tout en permettant une couverture spatiale étendue, avec une largeur de fauchée allant de 20 km à près de 500 km, selon les capteurs.

Les capteurs radar produisant leur propre source d'énergie, l'acquisition d'images est totalement indépendante des conditions de luminosité, et est donc possible de jour comme de nuit, ce qui est un avantage majeur par rapport aux capteurs optiques, qui sont dépendant du rayonnement solaire réfléchi par les objets. De plus, l'atmosphère ne présentant pas d'absorption marquée des hyperfréquences aux longueurs d'ondes supérieures à environ 12 GHz, les capteurs radar ont la capacité d'acquérir des images de la surface terrestre à travers les nuages (Bonn *et al.*, 1996). Ils permettent ainsi d'obtenir des images de qualité aux phases actives de la crue, durant

lesquelles les conditions de nébulosité sont souvent importantes (Evans *et al.*, 2010; Horritt *et al.*, 2001).

La rétrodiffusion du signal émis par un capteur RSO est particulièrement sensible à l'humidité de la surface imagée, à ses propriétés diélectriques, mais aussi à la rugosité de la surface et à sa géométrie (Baghdadi *et al.*, 2001). Cela lui confère un fort potentiel pour la détection des changements de conditions d'humidité du sol, et ainsi, pour la cartographie des zones inondées (Brisco *et al.*, 2008; Mallinis *et al.*, 2011).

Les capteurs à bord des satellites lancés depuis 2007, tels que les satellites Sentinel-1, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed ou encore RADARSAT-2, permettent maintenant l'acquisition d'images dont la résolution peut aller jusqu'à 1 m selon les modes d'acquisition. Ces améliorations vers la très haute résolution spatiale, antérieurement limitée à 8 m sur les capteurs satellitaires RSO, permettent ainsi d'obtenir une image précise et détaillée de la zone d'étude, adaptée aux analyses en milieu urbain (Schmitt *et al.*, 2010). Cette haute résolution se fait cependant au détriment de la largeur de fauchée au sol.

Une des limites à l'utilisation des satellites RSO pour le suivi opérationnel des inondations a été pendant longtemps leur trop basse résolution temporelle (Pulvirenti *et al.*, 2011b). Cependant, les mises en orbite des satellites de la constellation COSMO-SkyMed et bientôt ceux de la constellation RADARSAT permettent un temps de revisite dans un délai maximal de 12 h (Pierdicca *et al.*, 2010). De plus, certains capteurs RSO, comme RADARSAT-2, sont dotés d'une visée sélective (droite ou gauche) permettant la sélection du faisceau et de l'angle d'incidence, pour assurer un meilleur suivi de la région d'intérêt. Cela permet de réduire le temps d'observation moyen de ces satellites et d'accroître leur fréquence d'observation lors de situations jugées critiques (André *et al.*, 2002; Voigt *et al.*, 2008). Enfin, dans le cadre de la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, les acquisitions d'images sur les zones affectées par un aléa d'origine naturelle ou humaine sont prioritaires et leur mise à disposition est garantie dans un délai de 4 h à 12 h suivant leur acquisition (Ryan, 2007). On doit cependant souligner que si ces délais de plusieurs heures pour l'acquisition puis pour la livraison des données sont compatibles avec le suivi de crues lentes comme les crues fluviales, ils ne le sont pas avec des crues à cinétique rapide, telles que les crues éclair. Dans ces second cas, l'intérêt de l'imagerie radar n'est plus pour le suivi et la cartographie des zones inondées, mais plutôt pour la détection et l'analyse des dommages au sol.

La technologie RSO présente cependant certaines limites, qu'il est important de souligner. Un des problèmes récurrent associé aux images issues des capteurs RSO est celui de l'important bruit multiplicatif, appelé chatoiement. Ce bruit produit par une interférence aléatoire, constructive ou destructive, provient de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution entre les ondes cohérentes émises par le radar au niveau de la surface imagée (Henry, 2004; Ulaby *et al.*, 1986a). Ce bruit dégrade partiellement la radiométrie de l'image, ce qui rend son interprétation visuelle et numérique plus difficile. Si la très haute résolution spatiale des capteurs les plus récents est un de leur atout principal pour la cartographie des inondations, elle a également pour effet de détecter un grand nombre d'objets présents au sol, dont le signal rétrodiffusé peut parfois entraver la cartographie précise des zones inondées par des méthodes d'analyse traditionnelles (Giustarini *et al.*, 2011; Voigt *et al.*, 2008). C'est particulièrement le cas dans les milieux urbains, où de multiples réflecteurs tels que les murs, voitures, balcons, etc., peuvent dominer le signal par des mécanismes de rétrodiffusion multiple (Franceschetti *et al.*, 2002; Schumann *et al.*, 2011). Malgré ces derniers aspects, les capteurs radar satellitaires se présentent aujourd'hui comme un des outils les plus adaptés à la cartographie des zones inondées dans un contexte de gestion de crise (Cossu *et al.*, 2009).

2.2 Signatures radar des surfaces inondées

La diffusion de l'onde radar reçue par une surface, et ainsi sa signature radar, sont influencées par les propriétés de la surface imagée, à savoir sa rugosité, ses propriétés diélectriques, son orientation par rapport à l'onde incidente et sa forme; mais aussi par les caractéristiques de l'onde radar incidente, à savoir sa longueur d'onde, son angle d'incidence et sa polarisation (Bonn *et al.*, 1996; Martinis *et al.*, 2010). Nous définirons ici les mécanismes de diffusion déterminant la signature radar des différents types de surfaces inondées, ainsi que les paramètres d'acquisition permettant leur détection optimale.

2.2.1 Signatures radar des plans d'eau libre et des sols nus inondés

L'eau ayant une constante diélectrique très élevée, l'onde radar ne pénètre que de quelques millimètres sous sa surface. Ainsi, les plans d'eau libre et les sols nus inondés lisses et homogènes agissent comme réflecteurs spéculaires, rétrodiffusant intégralement le signal incident hors du champ de réception du capteur RSO (Horritt *et al.*, 2003; Hostache *et al.*, 2005;

Smith, 1997). Ils apparaissent ainsi avec des valeurs radiométriques très faibles sur les images (Figure 2.2). A l'inverse, les sols nus non inondés présentent une surface généralement irrégulière et rugueuse, et auront tendance à réfléchir le signal de manière diffuse, dans un grand nombre de directions. Une portion significative de l'onde incidente étant rétrodiffusée en direction du capteur, les coefficients de rétrodiffusion sont plus élevés, et seront ainsi traduits par des tons clairs sur l'image. Cela rend ainsi les sols non inondés aisément différenciables des plans d'eau libre et des sols nus inondés.

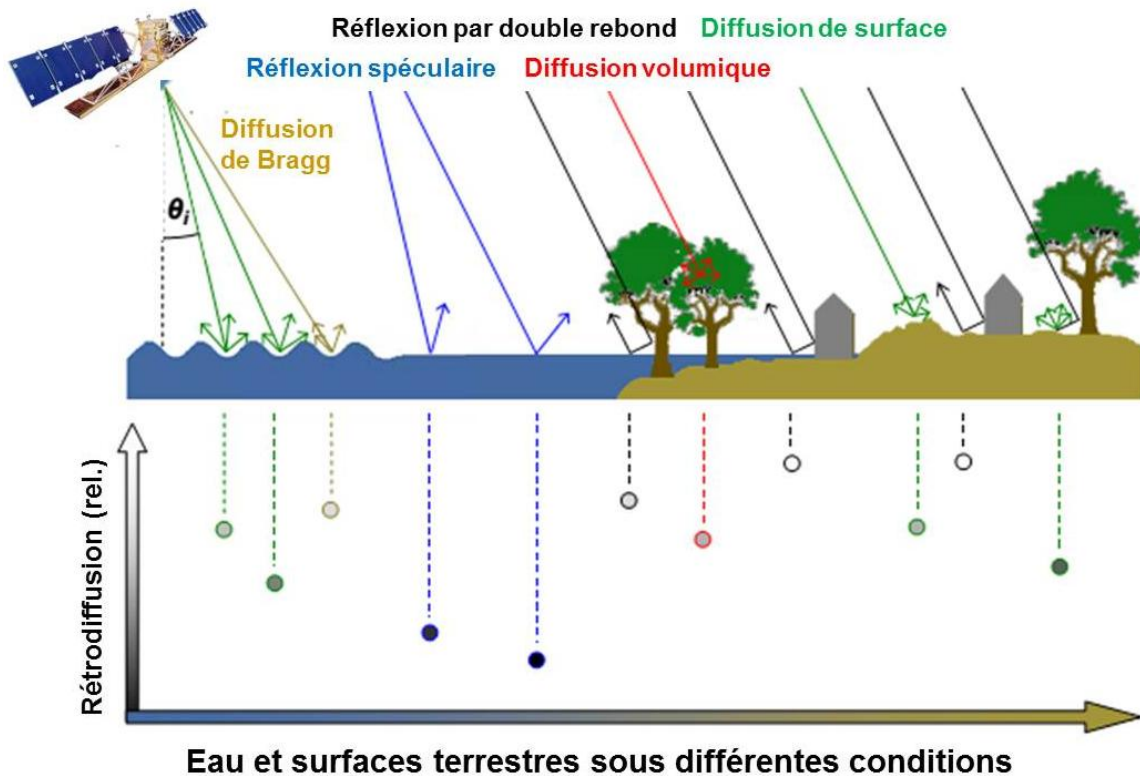


Figure 2.2: Mécanismes de rétrodiffusion des différents types d'occupation du sol (tirée de Martinis, 2010)

Selon le critère de Rayleigh, plus l'angle d'incidence de l'onde radar est grand, plus le contraste entre ces deux types de surfaces est marqué (Malnes *et al.*, 2002; Solbø *et al.*, 2005). On privilégie ainsi les angles d'incidences supérieurs à 35° pour une meilleure discrimination des plans d'eau et des sols nus inondés du reste de l'occupation du sol (Figure 2.3). Si les longueurs d'ondes plus faibles ont tendance, par leur plus grande sensibilité à la réflexion

diffuse, à faire augmenter la rétrodiffusion des surfaces d'eau lisse, elles apportent également un meilleur contraste entre l'eau et les autres types de surfaces au sol, puisque les objets pouvant paraître lisses et avec des tons similaires à l'eau sont moins nombreux qu'avec des longueurs d'ondes plus grandes. La bande X semble ainsi être plus adaptée à la détection des surfaces d'eau calme que les bandes C et L. Étant donné que la polarisation HH est moins sensible à la rugosité des surfaces et aux objets verticaux (tels que la végétation émergente) que la polarisation VV et offre également une meilleure dynamique radiométrique, elle est préférable pour la détection des zones d'eau libre (Henry *et al.*, 2006; Hess *et al.*, 1995; Townsend, 2002). Les polarisations croisées HV et VH présentent une dynamique radiométrique de l'eau libre plus faible que la polarisation HH, mais restent moins affectées par la rugosité de surface que la polarisation VV, ce qui les rend exploitables pour la détection des zones inondées (Henry *et al.*, 2006; Manjusree *et al.*, 2012).

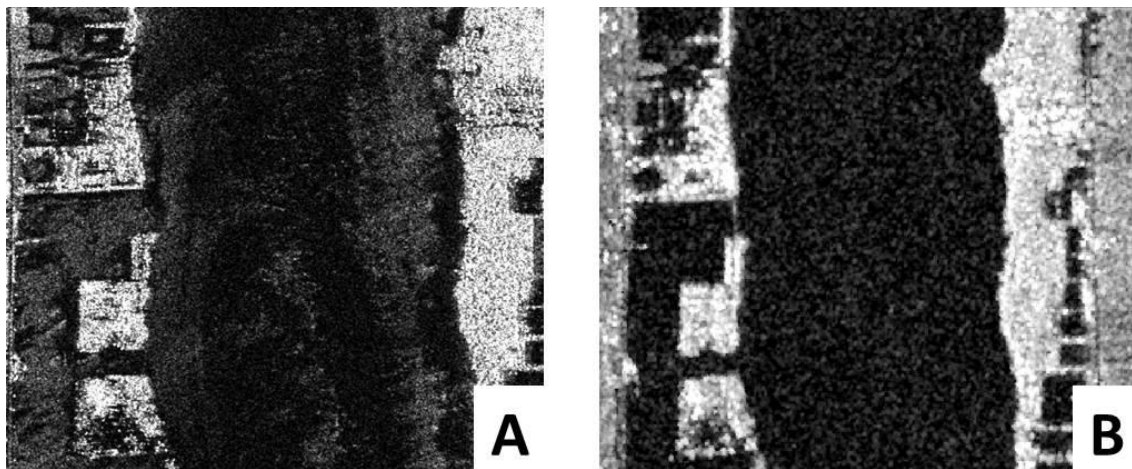


Figure 2.3: Zones d'eau libre extraites d'images RADARSAT-2 (Bande C) en polarisation HH acquises avec un angle d'incidence de 23° (vignette A) et de 37° (vignette B) sur la rivière Richelieu (Canada). La rugosité de surface, plus importante sur la vignette A, produit des tons plus clairs sur les zones d'eau libre.

2.2.2 Signature radar des surfaces d'eau en présence de vent

Lorsque la force exercée par le vent dépasse les forces de tension de surface, des vagues de gravité (de longueur d'onde d'un ou plusieurs mètres), sur lesquelles se superposent des vagues de capillarité (d'une longueur d'onde de l'ordre du centimètre ou moins), se forment à la

surface des plans d'eau. La rugosité de surface de l'eau étant plus élevée, la rétrodiffusion de type spéculaire ne domine plus et est remplacée localement par une réflexion diffuse de surface. Selon la vitesse du vent et sa direction par rapport à la direction de visée du capteur, le coefficient de rétrodiffusion de la surface de l'eau peut être élevé et être ainsi proche ou similaire à celui d'autres surfaces terrestres (Figure 2.2 et Figure 2.3)

A des angles d'incidences compris entre 30° et 70°, un cas particulier de rétrodiffusion peut apparaître sur les vagues de capillarité ou sur les vagues de gravité de longueur d'onde centimétrique. Si la distance oblique entre deux vagues successives orientées perpendiculairement à la direction de portée du radar correspond à la moitié de la longueur d'onde radar émise, un phénomène défini sous le terme de résonance de Bragg se produit (Holt, 2004; Ulaby *et al.*, 1986a). Il en résulte une augmentation importante de la rétrodiffusion par addition cohérente de retour des vagues adjacentes en phase (Bergeron, 2011). Ces vagues apparaîtront ainsi de manière très claire sur l'image radar. L'équation de Bragg, qui décrit la relation entre la longueur d'onde des vagues espacées périodiquement λ_R , la longueur d'onde λ et l'angle d'incidence θ_i du signal radar, peut être formulée de la manière suivante :

$$\lambda_R = \frac{k\lambda}{2 \sin \theta_i} \quad (1)$$

Où k est l'ordre de la résonance de Bragg, qui, dans les micro-ondes, est généralement de 1 (Ulaby *et al.*, 1982).

2.2.3 Signature radar de la végétation et des zones boisées inondées

Lorsqu'un sol couvert de végétaux (cultures, plantes basses, arbres, etc.) est inondé, le mécanisme de réflexion diffuse ne domine plus. La constante diélectrique d'un sol inondé étant plus élevée que celle d'un sol sec, une quantité importante d'énergie sera réfléchi de manière spéculaire par le sol inondé, puis sera soumise à une réflexion multiple entre l'eau et les sections les plus basses de la végétation (troncs et branches) (Hess *et al.*, 1995; Townsend, 2001). Il en résulte un fort retour du signal radar. Cela permet généralement de distinguer la végétation inondée de la végétation non inondée, dont la réflexion diffuse réduit de manière significative les effets de réflexions multiples et se traduit par des tons plus foncés sur l'image. Les berges des rivières, et, dans une moindre mesure, les bords des champs, étant souvent

bordés de zones végétales, il est important de tenir compte de ce phénomène pour ne pas fausser la délimitation des zones inondées (Horritt *et al.*, 2003; Mason *et al.*, 2012a).

Cependant, on doit souligner que le signal rétrodiffusé par la végétation est complexe, et dépend d'un grand nombre de facteurs relatifs aux paramètres du signal radar émis, à savoir sa longueur d'onde, son angle d'incidence et sa polarisation; mais aussi relatifs à la végétation, à savoir le type de canopée imagée, sa structure et sa densité (Kasischke *et al.*, 1997a; Lang *et al.*, 2008; Pierdicca *et al.*, 2013; Töyrä *et al.*, 2001).

De manière générale, plus la longueur d'onde du signal émis est grande, moins l'onde radar est influencée par la taille des feuilles composant la canopée de la végétation, et plus sa capacité à pénétrer la canopée est grande. Les longues longueurs d'onde, comme celles de la bande L et de la bande P, permettent ainsi au signal de pénétrer la canopée et de créer une interaction du signal entre le sol inondé et les troncs (Adam *et al.*, 1998; Hess *et al.*, 1990; Kasischke *et al.*, 1997a; Townsend, 2002). Elles produisent ainsi un phénomène de double rebond, résultant en des tons clairs sur l'image (Figure 2.4). A l'inverse, les longueurs d'ondes des bandes C et X sont très largement atténuées par les couches supérieures de la canopée et seront ainsi majoritairement soumises à une diffusion de volume. Elles ne permettent pas d'obtenir des informations sur la présence d'eau au sol.

Cependant, plusieurs études ont montré qu'en présence d'une canopée éparse ou ayant un couvert végétal faible ou peu dense (en particulier en conditions hivernales ou au début du printemps), une interaction de l'onde radar émise en bande C est possible entre les sols inondés et les troncs environnants, ce qui permet d'exploiter le signal rétrodiffusé à des fins de cartographie des zones boisées inondées (Adam *et al.*, 1998; Kasischke *et al.*, 1997b; Townsend, 2001). Les longueurs d'onde de la bande C, mais aussi de la bande X, ont également la capacité de pénétrer les végétations basses et éparse typiques des zones humides et herbeuses, et ainsi de produire une réflexion par rebonds multiples entre la surface d'eau au sol et les couches basses de la végétation (Figure 2.4) (Horritt *et al.*, 2003; Ramsey, 1995).

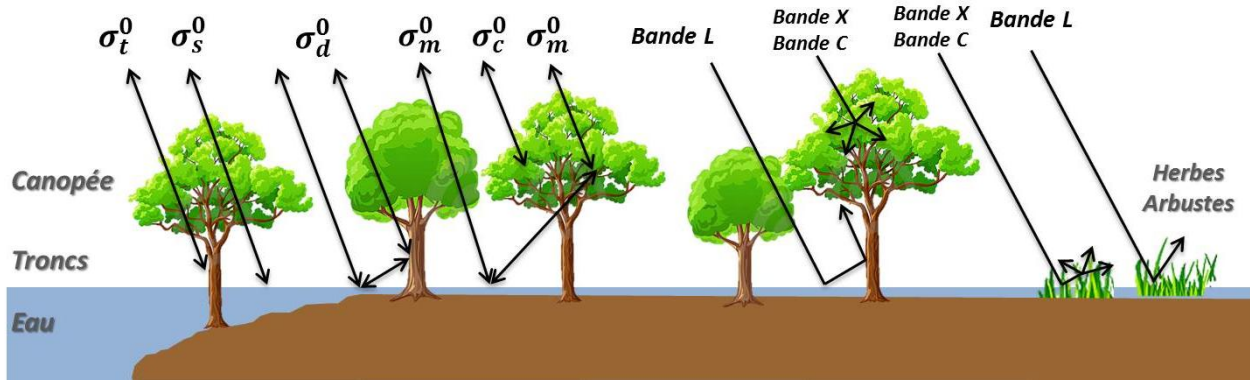


Figure 2.4: Illustration conceptuelle des sources principales de rétrodiffusion du signal radar par la végétation (tirée de Martinis, 2010; modifié depuis Kasischke *et al.*, 1997a; et Lang *et al.*, 2008) et effets de la végétation inondées sur la rétrodiffusion des bandes L, X et C (modifié depuis Ormsby *et al.*, 1985).

Les interactions du signal radar avec la végétation ont été décrites dans plusieurs modèles théoriques de rétrodiffusion. Selon Kasischke *et al.* (1997a) mais aussi Townsend (2002), le coefficient de rétrodiffusion, noté σ_{t-h}^0 , des marais et autres milieux humides dominés par de la végétation herbacée peut être décrit par :

$$\sigma_{t-h}^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 (\sigma_s^0 + \sigma_m^0) \quad (2)$$

Où : σ_c^0 est le coefficient de rétrodiffusion de la canopée de la végétation

τ_c représente le coefficient de transmission de la canopée de la végétation

σ_s^0 est la rétrodiffusion de surface directe du sol

σ_m^0 est la diffusion multi-trajets entre la surface du sol et la canopée

Dans le cas des milieux humides (ou inondés) contenant une végétation boisée ou arbustive, d'autres paramètres, comme la rétrodiffusion directe des troncs des arbres, l'atténuation du signal radar par les troncs des arbres et la diffusion par double rebond entre les troncs et la surface de l'eau doivent être pris en compte.

Le coefficient de rétrodiffusion σ_{t-w}^0 de ces milieux peut ainsi être exprimé comme :

$$\sigma_{t-w}^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 \tau_t^2 (\sigma_m^0 + \sigma_t^0 \sigma_s^0 + \sigma_d^0) \quad (3)$$

Où : σ_c^0 est le coefficient de rétrodiffusion de la canopée de la végétation
 τ_c est le coefficient de transmission de la canopée de la végétation
 τ_t est le coefficient de transmission du signal par les troncs des arbres
 σ_m^0 est la diffusion multi-trajets entre la surface du sol et la canopée
 σ_t^0 est la diffusion directe des troncs d'arbres
 σ_s^0 est la diffusion de surface directe du sol
 σ_d^0 est la diffusion par double rebond entre les troncs et le sol

L'angle d'incidence a lui aussi un impact important sur la détection des zones végétales et boisées inondées. De manière générale, on considère qu'aux larges angles d'incidence ($>40^\circ$), la transmissivité de l'onde à travers la canopée est faible. La diffusion de volume au niveau des couches supérieures de la canopée domine, ce qui ne permet qu'à une faible quantité d'énergie de toucher le sol. Les faibles angles d'incidence (proches de 20°) offrent, grâce à leur plus courte longueur de trajet de propagation entre le point d'entrée de l'onde dans la canopée et la surface de l'eau, une meilleure transmissivité de l'onde radar à travers la canopée et permettent ainsi au mécanisme de rebonds multiples de se produire entre le sol et les couches inférieures de la végétation (Bourgeau-Chavez *et al.*, 1997; Horritt *et al.*, 2003; Töyrä *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 1995). Cependant, plusieurs études apportent une nuance à ces considérations. Outre l'angle d'incidence, la structure et le type de forêt imagée influencent également de manière importante la rétrodiffusion du signal (Hess *et al.*, 1990; Townsend, 2002). Dans une étude mettant à profit des images en polarisation HH acquises par le satellite RADARSAT-1 (bande C), Lang *et al.* (2008) montrent que si en présence d'un couvert de feuilles, la capacité de détection des zones boisées inondées varie grandement avec l'angle d'incidence, en l'absence de feuilles, cette capacité est surtout dépendante du type de forêt imagée. Si les auteurs notent un déclin de la rétrodiffusion totale avec des angles d'incidences plus grands (de $43,5^\circ$ à 47°), le plus faible angle d'incidence utilisé dans l'étude ($23,5^\circ$) présente également la plus faible différence moyenne de coefficient de rétrodiffusion entre les forêts inondées et les forêts non inondées, et cela en présence comme en l'absence d'un couvert de feuilles. Selon les auteurs, cela peut dépendre de l'orientation des feuilles constituant la canopée durant les saisons où le feuillage est présent, mais aussi de l'humidité du sol en l'absence d'inondation. Dans le cas d'étude présenté, la meilleure distinction entre les forêts inondées et les forêts non inondées est obtenue avec des angles d'incidence intermédiaires, variant entre $27,5^\circ$ et $33,5^\circ$.

Finalement, les co-polarisations HH et VV sont privilégiées pour la détection des zones végétales et des boisés inondés, bien que le ratio de rétrodiffusion entre les forêts inondées et les forêts non inondées soit plus important en polarisation HH qu'en polarisation VV. Les polarisations croisées HV et VH ne produisent qu'une faible rétrodiffusion, car les diffusions multiples ont pour effet de ne pas dépolariser le signal.

2.2.4 Les zones urbaines inondées

En zone urbaine, plusieurs facteurs peuvent venir complexifier la détection des zones inondées. Tout d'abord, les zones urbaines sont constituées de nombreuses surfaces lisses, souvent recouvertes d'asphalte, tels que les stationnements, les rues, les tarmacs d'aéroports, etc. ayant une rétrodiffusion de type spéculaire. Ces surfaces sont donc caractérisées par des tons très foncés sur les images radar. En situation d'inondation, ces surfaces conservent une rétrodiffusion de type spéculaire. Il est donc très difficile de déterminer si elles sont affectées ou non par l'inondation (Badji *et al.*, 1997; Giustarini *et al.*, 2013; Oberstadler *et al.*, 1997; Solbø *et al.*, 2005). La réflexion spéculaire des routes et des rues est principalement visible quand celles-ci sont orientées de manière orthogonale à la direction de vol du capteur (Pulvirenti *et al.*, 2015). Ainsi, l'étude présentée par Soergel *et al.* (2005) a permis de montrer que sur des données RSO aéroportées de la ville de Karlsruhe (Allemagne), seul le tiers de la superficie totale des routes inondées était réellement visible par le capteur. Les mêmes auteurs ont démontré qu'une section de route entre deux bâtiments peut être détectée correctement uniquement si la condition de largeur de la route L_R (Figure 2.5) correspond à :

$$L_R > CD + AB = h_2 \cdot \tan \theta + h_1 \cdot \cot \theta \quad (4)$$

Où : θ est l'angle de visée

h_1 et h_2 sont les hauteurs des bâtiments de part et d'autre de la route

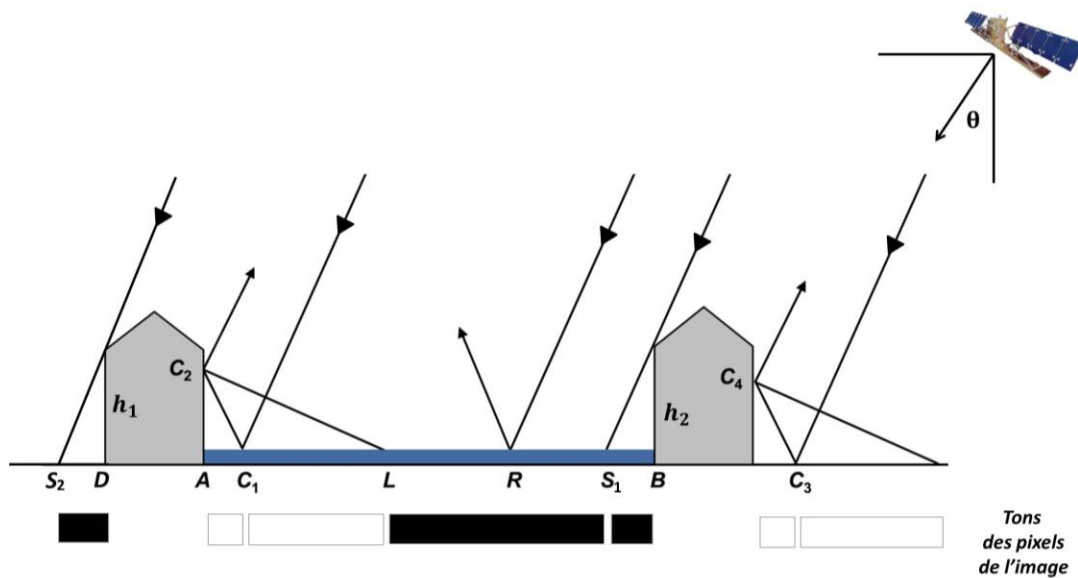


Figure 2.5: Rétrodiffusion du signal radar en milieu urbain et tons associés des pixels de l'image : pour des zones de déversement (AL) et d'ombre (S_1B) entre deux bâtiments dans une rue inondée (AB); pour une zone d'ombre sur un sol sec (S_1D); pour une surface d'eau calme (R), et en présence d'un double rebond du signal entre le sol, en condition d'inondation ($C_1 C_2$) et en conditions sèches ($C_3 C_4$) (modifiée de Martinis, 2010)

En supposant un angle de visée de 20° et des hauteurs de bâtiments de 10 m, seule une route de plus de 30 m de largeur peut être entièrement vue par le capteur, sans être soumise aux effets d'ombre et de déversement (Mason *et al.*, 2014). Ainsi, plus la distance entre les bâtiments est importante et plus la résolution spatiale du capteur est fine, plus la capacité du capteur à détecter la réflexion spéculaire des zones inondées est supposée être grande.

Les effets de rétrodiffusion par double rebond (ou par rebonds multiples) sont également récurrents en zone urbaine, et peuvent être la source d'incertitudes quant à la présence d'eau à proximité de certains bâtiments. Ce phénomène implique les structures diédrales formées par les murs verticaux des bâtiments et le sol, alignés de manière orthogonale au faisceau radar incident (Franceschetti *et al.*, 2002; Richards, 2009). L'onde radar atteint le sol, puis est rétrodiffusée vers le mur du bâtiment, qui, par son angle droit avec le sol, force l'énergie radar à être rétrodiffusée en direction de l'antenne. Les parcours de rétrodiffusion par double rebond ont une longueur identique, correspondant à la distance de l'intersection entre le sol et le mur du bâtiment (Soergel *et al.*, 2005). Il en résulte une ligne très claire située sur le côté du bâtiment illuminé par le radar. Ainsi, même si le bâtiment est entouré de surfaces asphaltées lisses ou d'eau, qui font que les changements de rugosité de surface sont négligeables, l'augmentation

de la réflectivité due à l'augmentation de la constante diélectrique des surfaces implique, en principe, une augmentation importante de l'effet de double rebond. L'effet de double rebond entre le sol et les bâtiments peut être visualisé sur la Figure 2.5, entre les points C_1 et C_2 en condition d'inondation et entre les points C_3 et C_4 en situation sèche.

De plus, à cause de la géométrie de visée latérale des capteurs RSO, d'importantes sections du sol peuvent ne pas être visibles par le capteur à cause des phénomènes d'ombre et de déversement engendrés par les bâtiments et la végétation haute orientés de manière parallèle à la direction de visée du capteur (Soergel, 2010). Le sol sera dans l'ombre radar (zone située entre les points S et B sur la Figure 2.5) s'il est caché au capteur par un bâtiment, et apparaîtra ainsi sur l'image dans des tons très foncés. Ces zones d'ombre peuvent en réalité contenir des sols secs, mais être classées comme « inondées » à cause de leur faible coefficient de rétrodiffusion (Giustarini *et al.*, 2013; Mason *et al.*, 2014). A l'inverse, le sol faisant face au mur d'un bâtiment placé dans la direction d'acquisition du capteur peut être situé dans la même cellule de distance (*range bin*) que le mur, causant ainsi un phénomène de déversement (zone située entre les points A et L sur la Figure 2.5). Il en résulte généralement un mélange des contributions des signaux rétrodiffusés du mur et du sol dans l'image radar au sein d'une même cellule de résolution (Soergel *et al.*, 2005). Les zones de déversement sont ainsi caractérisées par des tons très clairs sur les images RSO, et sont souvent classifiées comme « inondées », qu'elles le soient ou non en réalité.

La magnitude de ces effets géométriques dépend en grande partie de l'angle d'incidence du signal radar (Mason *et al.*, 2014). Les zones de déversement sont généralement de plus grande taille si l'image RSO a été acquise avec de faibles angles d'incidence, alors que le phénomène d'ombre sera plus marqué pour les angles d'incidence élevés. Ainsi, l'angle d'incidence de l'image doit être sélectionné avec attention afin d'atteindre un compromis acceptable entre les zones d'ombre et de déversement (Soergel, 2010). Celles-ci peuvent malgré tout représenter une superficie non négligeable de la zone urbaine imagée par le capteur RSO, comme le montre la Figure 2.6, extraite des travaux de Mason *et al.* (2010). Sur l'exemple présenté dans cette étude, il est considéré que les zones d'ombre et de déversement représentent près de 39% de la zone urbaine d'intérêt imagée par le capteur TerraSAR-X (mode StripMap, polarisation HH, angle d'incidence de 24°).

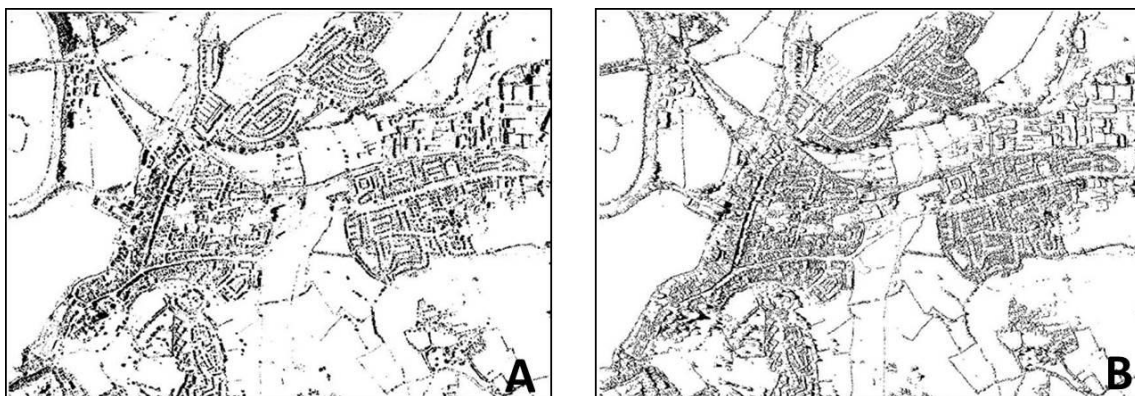


Figure 2.6: En noir, régions de l'image TerraSAR-X affectées par les phénomènes d'ombres (A) et de déversement (B) (tirée de Mason *et al.*, 2010)

2.3 Détection des zones inondées à l'aide de l'imagerie RSO : un état de l'art

Cette section présente un état de l'art des techniques de détection des zones urbaines et rurales inondées à l'aide de l'imagerie RSO. Son objectif est de présenter les principales approches proposées dans la littérature, et ainsi de mettre en relief les différents éléments ayant orienté et justifiant les développements méthodologiques qui seront présentés au Chapitre 3.

2.3.1 L'interprétation visuelle

L'interprétation visuelle des images RSO d'inondation et la délimitation manuelle des zones inondées constituent un des moyens les plus simples pour obtenir une cartographie de l'étendue des zones inondées, en exploitant les tons très foncés des surfaces d'eau (Hoque *et al.*, 2011; MacIntosh *et al.*, 1995; Oberstadler *et al.*, 1997; Sanyal *et al.*, 2004). Cependant, la précision et la qualité de la cartographie dépendent fortement des connaissances de la personne chargée de l'interprétation de l'image (Schumann *et al.*, 2012). De plus, si les tons foncés des surfaces d'eau permettent de les distinguer aisément du reste de l'occupation du sol, il n'en va pas de même pour les zones de végétation et de forêts inondées, ainsi que pour les zones urbaines inondées, qui peuvent conserver des tons clairs, qu'elles soient inondées ou non. Leur délimitation manuelle est alors complexe. L'application de cette méthode peut être particulièrement longue si l'inondation imagée par le capteur occupe une grande superficie

(Matgen *et al.*, 2007a). N'étant de plus pas automatisable, elle n'est ainsi que très rarement mise à profit pour la détection des zones urbaines et rurales inondées. Diverses méthodes d'analyse digitale des images RSO lui sont préférées.

2.3.2 Les classifications supervisées

Quelques rares études ont mis à profit les approches de classification supervisée pour la cartographie des zones inondées à partir d'images RSO. Par exemple, De Roo *et al.* (1999) ont utilisé une approche de classification par maximum de vraisemblance pour distinguer les zones « inondées » des zones « non inondées » sur des images ERS-1/2, en supposant des distributions approximativement normales des deux classes. Les sites d'entraînement sont sélectionnés manuellement sur la base des rétrodiffusions des pixels de l'image. Dans Dewan *et al.* (2006), qui utilisent une approche identique, les sites d'entraînement sont sélectionnés sur une série d'images RADARSAT-1 en tenant également compte de données d'élévation et de données d'occupation du sol. Les deux études soulignent qu'en dépit d'une détection relativement précise des zones inondées en eau libre (proche de 85%), d'importantes confusions apparaissent entre les surfaces d'eau libre et les surfaces permanentes de grande superficie ayant une rétrodiffusion de type spéculaire. Différemment, dans Bonn *et al.* (2005), une méthode simple de classification non paramétrique, à savoir un classificateur parallélépipédique, est utilisée pour identifier les zones inondées en eau libre sur des images RADARSAT-1 de la rivière Rouge, au Manitoba (Canada). Une édition manuelle est ensuite utilisée pour retirer les pixels mal classifiés. Enfin, dans Townsend (2002), une classification par arbre de décision binaire est appliquée sur des données RADARSAT-1 et ERS-1 pour différencier les forêts inondées des forêts non inondées. Pour chaque classe, les sites d'entraînement sont sélectionnés manuellement en tenant compte de leur élévation par rapport à un niveau d'eau modélisé et de leur rétrodiffusion. Cette approche a été utilisée par la suite par Wang (2004) pour distinguer les zones inondées en eau libre des zones non inondées, et les forêts inondées des forêts non inondées, et en faire le suivi saisonnier à l'aide de séries d'images JERS-1 (bande L, polarisation HH).

Ces différentes approches présentent l'avantage d'être relativement simples à appliquer aux images RSO et sont disponibles dans la plupart des logiciels de traitement et d'analyses d'images satellitaires. Cependant, la précision des résultats obtenus dépend, encore une fois, des capacités d'analyse de la personne sélectionnant les sites d'entraînement. De plus, les propriétés statistiques des différents types d'occupation du sol peuvent varier de manière

significative au sein d'une même image, en particulier si celles-ci sont de haute ou de très haute résolution spatiale, ce qui peut constituer d'importantes sources d'erreurs de classification. Cela implique souvent le recours à une édition manuelle des résultats de la classification (Bonn *et al.*, 2005), ou encore l'application d'un filtre spatial (De Roo *et al.*, 1999), afin de retirer les pixels mal classifiés ou isolés de la classification.

2.3.3 Les techniques de seuillage

La technique du seuillage manuel d'histogramme a été très largement utilisée pour distinguer les zones inondées des zones non inondées sur les images RSO. Cette technique est appréciée pour sa relative simplicité et pour ses faibles temps de traitement, compatibles avec les fortes contraintes temporelles associées à la gestion de crise (Hahmann *et al.*, 2008; Martinis *et al.*, 2009). De manière générale, tous les pixels de l'image RSO ayant une intensité ou une amplitude inférieure ou égale à une valeur seuil donnée sont considérés comme étant de l'« eau », alors que les autres pixels de l'image sont considérés comme « non inondés ». Dans de nombreuses études, ce seuil est déterminé par inspection visuelle de l'histogramme des intensités de rétrodiffusion de l'image ou encore par essais et erreurs (Ahtonen *et al.*, 2005; Bartsch *et al.*, 2008; Brivio *et al.*, 2002; Henry *et al.*, 2006; Hess *et al.*, 1995; Townsend, 2001; Townsend *et al.*, 1998; Zwenzner *et al.*, 2009). Une des limites de ces approches de seuillage est que le seuil utilisé peut varier de manière significative selon les paramètres d'acquisition de l'image et le type d'environnement, ce qui induit qu'il doit être déterminé de manière individuelle pour chaque image (Hahmann *et al.*, 2010; Solbø *et al.*, 2005). Une étude récente s'est intéressée à l'optimisation de gammes de seuils pour la détection des zones inondées à l'aide d'images RADARSAT-2 acquises avec différentes polarisations (HH, HV, VV, VH) et des angles d'incidence variant de 20° à 49° (Manjusree *et al.*, 2012). Elle a abouti à la proposition de gammes de seuils jugés optimaux pour la classification des eaux d'inondation, selon la polarisation utilisée : de -8 décibels (dB) à -15 dB en polarisation HH, de -15 dB à -24 dB en polarisation HV et de -6 dB à -15 dB en polarisation VV.

Cependant, grâce à la volonté de plus en plus importante de proposer des approches automatisées et utilisables en temps quasi-réel, des approches de seuillage non supervisé ont été présentées ou intégrées aux algorithmes de détection des zones inondées par imagerie radar. De nombreuses études ont ainsi mis à profit la méthode d'Otsu (Otsu, 1979), qui permet de rechercher sur l'histogramme des rétrodiffusions de l'image le seuil optimal minimisant la variance intra-classe et maximisant la variance inter-classes, pour obtenir une classification

binaire « eau » et « non eau » d'une image RSO d'inondation (Di Baldassarre *et al.*, 2009; Di Baldassarre *et al.*, 2011; Greifeneder *et al.*, 2014; Pulvirenti *et al.*, 2013a; Schumann *et al.*, 2010b; Schumann *et al.*, 2011). Différemment, dans Matgen *et al.* (2011), la valeur de rétrodiffusion pour laquelle la différence cumulée entre les fonctions empiriques et théoriques des rétrodiffusions de l'eau libre, extraites d'images ENVISAT (polarisation VV) et RADARSAT-1, atteint 1% de la probabilité cumulative est fixée comme seuil. Les pixels ayant une valeur de rétrodiffusion inférieure ou égale à ce seuil sont considérés comme appartenant à la classe « eau » et sont utilisés comme noyaux de croissance dans une approche de classification par croissance de régions. Dans les travaux présentés par Martinis *et al.* (2009), et par la suite par Martinis *et al.* (2015a), différentes combinaisons d'approches de seuillage, toutes basées sur l'algorithme KI de seuillage par minimum d'erreur (Kittler *et al.*, 1985), sont appliquées sur l'information de rétrodiffusion extraite de tuiles de tailles égales d'une image TerraSAR-X, afin d'en extraire un seuil global qui sera ensuite appliqué à un processus de segmentation multi-échelles.

De manière générale, les techniques de seuillage binaire de l'image produisent des résultats satisfaisants, si un seuil optimal est utilisé et si les surfaces d'eau sont lisses et réfléchissent le signal de manière spéculaire. Cependant, comme souligné par Hahmann *et al.* (2010), en présence d'une surface d'eau rendue rugueuse par l'action du vent ou en présence de végétation émergente, les valeurs de rétrodiffusion de l'eau libre auront tendance à se confondre avec celles des terres non inondées, ce qui peut conduire à des erreurs de classification importantes si un seuil unique est utilisé. De plus, les approches de seuillage automatique ne sont plus utilisées seules pour la détection des zones inondées, mais sont intégrées à des approches hybrides, combinant plusieurs méthodes (Giustarini *et al.*, 2013; Long *et al.*, 2014; Schumann *et al.*, 2011). Il est considéré qu'utilisé seul, le seuillage ne permet pas une délimitation précise des zones inondées, en particulier sur les images radar de très haute résolution spatiale. Enfin, ces approches se limitent à la détection des zones d'eau libre, et ne permettent pas l'identification d'autres types de zones inondées, telles que les végétations inondées ou les zones urbaines inondées, dont les rétrodiffusions sont difficilement discernables de celles des autres types de sols non inondés.

2.3.4 La logique floue

L'ambiguïté des signatures radar des zones inondées, notamment en présence de végétation ou de vent, et la difficulté de les détecter de manière précise à l'aide d'un seuil unique, ont mené

au développement d'approches basées sur la logique floue. Alors que dans les théories d'ensembles classiques utilisant un seuil unique, un pixel appartient ou n'appartient pas à une classe donnée, les pixels d'un ensemble flou se voient attribuer des degrés d'appartenance à une classe, selon leurs positions à l'intérieur des limites de cet ensemble flou, déterminées à l'aide de deux seuils.

Une des approches les plus basiques de classification de l'eau libre par logique floue est illustrée dans les travaux présentés par Hostache *et al.* (2009). Les seuils délimitant l'ensemble flou correspondent à la valeur maximale de la distribution radiométrique de l'eau (notée T_{min}) et à la valeur minimale de celle du reste de l'occupation du sol (notée T_{max}), extraites d'une image ENVISAT en polarisation HH-HV. Les pixels dont la rétrodiffusion est supérieure à T_{max} se voient attribuer la valeur 0 (non inondés), ceux ayant une rétrodiffusion inférieure à T_{min} la valeur 1 (certainement inondés) et ceux ayant une rétrodiffusion comprise entre T_{min} et T_{max} la valeur 2 (potentiellement inondés). Les résultats présentés par les auteurs ne font pas état de la précision de la détection de l'eau obtenue grâce à cette méthode, et se concentrent avant tout sur la précision des niveaux d'eau extraits des zones inondées détectées grâce à cette méthode.

Parallèlement, plusieurs études ont présenté des approches utilisant la classification par logique floue pour la cartographie de différents types d'occupation du sol inondés. La détection des zones inondées ne se fait plus uniquement sur la base des intensités de rétrodiffusion des pixels de l'image, mais en tenant compte d'autres sources d'information. Ainsi, Macina *et al.* (2006) ont été parmi les premiers à choisir de gérer la complexité de l'interprétation des rétrodiffusions des surfaces inondées en tirant profit de différentes sources d'information, telles que l'évolution des intensités de rétrodiffusion estimées à l'aide d'une approche de détection des changements, l'occupation du sol ou encore l'élévation. Chacune de ces informations est intégrée à l'algorithme de classification à l'aide d'une fonction d'appartenance spécifique. Une fonction d'appartenance de forme S, dont les paramètres sont sélectionnés manuellement par analyse de l'histogramme des rétrodiffusions de l'image RSO, est définie pour identifier les surfaces inondées sur l'image acquise durant l'inondation. A l'inverse, l'identification des zones présentant une augmentation des rétrodiffusions due à la présence d'eau est réalisée à l'aide d'une fonction standard de forme Z, dont les paramètres sont sélectionnés manuellement. Des fonctions d'appartenance sont également définies pour les zones de faible altitude, une autre pour les zones de faible pente et une dernière pour les zones de faible concavité. Chaque pixel de l'image se voit ainsi attribuer un degré d'appartenance dont la valeur est un nombre réel situé

dans l'intervalle [0,1], qui est estimé à l'aide d'une moyenne pondérée des résultats des différentes fonctions d'appartenance. La classification est ensuite affinée à l'aide de l'information de contexte des pixels inclus dans la classe « eau ». Finalement, seuls les pixels ayant un degré d'appartenance supérieur à 0,5 sont conservés dans la classification. La procédure, utilisée par Pierdicca *et al.* (2008) sur des images d'inondation acquises par le satellite ERS-1 (polarisation VV) dans la région d'Alexandrie (Italie), a permis d'identifier correctement 87% des pixels inondés, avec des erreurs de commission de l'ordre de 5%. Des informations précises sur les résultats de la classification par type d'occupation du sol ne sont cependant pas données.

Plusieurs modifications ont été apportées à cette approche par Pulvirenti *et al.* (2011b) et Pulvirenti *et al.* (2013b). Afin de ne pas avoir à sélectionner de manière manuelle les paramètres des fonctions d'appartenance standard S et Z, les auteurs proposent d'utiliser les sorties de plusieurs modèles électromagnétiques, pour simuler les retours radar en situation d'inondation en milieux agricoles et forestiers (Ferrazzoli *et al.*, 1995) et en milieux urbains (Franceschetti *et al.*, 2002). Les rétrodiffusions de ces différents types d'occupation du sol ont été mesurées pour différentes bandes de fréquence (L, C, X), pour les co-polarisations horizontales et verticales, et pour différents angles d'incidence. L'utilisation d'une image RSO acquise en conditions sèches, utile pour détecter les zones urbaines et végétales inondées, n'est considérée que comme optionnelle. Cette méthode améliorée est utilisée de manière opérationnelle depuis quelques années à travers le projet « OPERA-civil protection from floods » développé en Italie (Boni *et al.*, 2009). Elle a été testée avec succès sur plusieurs scénarios d'inondations dans le monde, à l'aide de données COSMO-SkyMed (Pierdicca *et al.*, 2013). Cependant, certaines améliorations semblent nécessaires pour permettre l'obtention d'une cartographie précise des zones inondées en milieu urbain, la méthode ne permettant pas de s'affranchir des erreurs dues aux effets d'ombre et de déversement, fréquents dans ces milieux.

2.3.5 La détection des changements par amplitude

Les approches de détection des changements utilisant des images RSO multi-temporelles, dont l'utilisation a déjà été mentionnée dans les paragraphes précédents, ont été très largement mises à profit pour la détection et la cartographie des zones inondées (Giordano *et al.*, 2005). Plusieurs auteurs ont souligné l'intérêt de ces approches pour la classification des images radar, dont le signal rétrodiffusé est parfois complexe à interpréter en situation d'inondation, en particulier quand une seule image en polarisation simple est disponible (Badji *et al.*, 1997; Brivio *et al.*, 2002; Chini *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 1995). De plus, comme souligné par Schlaffer *et al.*

(2015), une des limites des approches mono-temporelles est qu'elles ne permettent pas de différencier les plans d'eau permanents des plans d'eau inondés. Les capacités de détection des changements de l'imagerie RSO sont exploitées en utilisant au minimum deux images, l'une acquise avant ou après l'inondation et servant ainsi à établir les coefficients de rétrodiffusion de référence des pixels de l'image, et l'autre acquise au cours de l'inondation, présentant des coefficients de rétrodiffusion affectés par la présence d'eau (André *et al.*, 2002; Pulvirenti *et al.*, 2011a). Ces deux images doivent présenter des paramètres d'acquisition similaires (fréquence, polarisation, angle d'incidence et direction de visée), doivent avoir été acquises à des dates proches et être parfaitement superposées, dans le but de limiter au maximum la détection de changements autres que ceux dus à la présence d'eau au sol (Boni *et al.*, 2009; Hostache *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2004; Schlaffer *et al.*, 2015; Weydahl, 1996).

Dans le domaine de la détection des changements, on distingue les approches basées sur l'amplitude de celles basées sur la cohérence, qui seront présentées dans la sous-section suivante. De manière générale, les approches de détection des changements par amplitude identifient comme inondées les zones où les coefficients de rétrodiffusion σ^0 de l'image d'inondation sont considérablement réduits par rapport à ceux de l'image de référence. Elles peuvent cependant également tenir compte des augmentations de coefficients de rétrodiffusion dus à la présence d'eau au sol, en particulier dans les zones végétales et forestières. Parmi les approches de détection des changements les plus basiques, on retrouve la comparaison post-classification (Herrera-Cruz *et al.*, 2009; Selvi *et al.*, 2014), la différence d'images (Long *et al.*, 2014; MacMillan *et al.*, 2006) ou encore le ratio d'images (Andreoli *et al.*, 2007; Townsend *et al.*, 1998). Une des techniques les plus couramment utilisées pour la détection des zones inondées à l'aide de couples d'images RSO reste cependant le calcul d'un indice de changement simple, à savoir la différence normalisée entre les images multi-temporelles (Badji *et al.*, 1997; Dellepiane *et al.*, 2010; Martinis *et al.*, 2011; Nico *et al.*, 2000).

De manière plus complexe, Schmitt *et al.* (2010) ont utilisé une approche de détection des changements basée sur les différences de coefficients d'ondelettes pour détecter des zones inondées à l'aide de deux images TerraSAR-X. Brisco *et al.* (2013) ont par la suite adapté cette méthode pour la rendre applicable à des décompositions polarimétriques issues de données RADARSAT-2 présentant des zones de végétation inondées. Schlaffer *et al.* (2015) ont récemment utilisé une approche basée sur les analyses d'harmonies et l'optimisation automatique de seuillage pour caractériser les rétrodiffusions saisonnières des pixels en situation sèche sur une large série d'images ENVISAT ASAR et pour détecter ainsi les pixels

d'une image d'inondation dont les rétrodiffusions dévient de manière importante de leurs rétrodiffusions saisonnières. Cette dernière méthode montre des résultats relativement satisfaisants en zones rurales, près de 75% des pixels ruraux inondés étant correctement identifiés; la précision de la détection en zone urbaine est bien plus faible, avec seulement 50% des pixels correctement détectés.

Enfin, dans Giustarini *et al.* (2013), qui présentent une des rares méthodes de détection des inondations en milieu urbain, la différence d'images est utilisée non pas pour détecter les changements de rétrodiffusion dus à la présence d'eau, mais pour identifier et masquer les zones affectées par les effets d'ombres et les zones ayant une rétrodiffusion spéculaire permanente, qui peuvent produire d'importantes sur-détections des zones d'eau libre. Ce masque est ensuite intégré à une approche hybride de détection des zones inondées en milieu urbain, basée sur les travaux de Matgen *et al.* (2011).

Malgré les avantages des approches de détection des changements d'amplitude, leur utilisation de manière opérationnelle peut être grandement limitée par la disponibilité d'une image de référence acquise avec des paramètres identiques à celle de l'image d'inondation et un état de développement de la végétation similaire. Comme l'ont souligné Giustarini *et al.* (2013), les images appropriées peuvent être en nombre très limité, en particulier dans le cas de satellites RSO relativement récents, même si leurs archives d'images s'enrichissent peu à peu.

2.3.6 L'interférométrie radar

Diverses études ont démontré l'intérêt d'exploiter l'information de cohérence interférométrique pour la détection et la cartographie des zones inondées en eau libre (Buck *et al.*, 2000; Dellepiane *et al.*, 2000; Geudtner *et al.*, 1996), des zones de végétation inondées et des zones bâties inondées (Marinelli *et al.*, 1997), mais aussi pour le suivi de l'évolution des eaux d'inondation et l'analyse des mouvements des débris produits par l'inondation (Chini *et al.*, 2012). La cohérence interférométrique est une mesure du degré de corrélation entre deux images complexes (phase et amplitude). L'identification des changements de conditions au sol se fait ainsi par la mesure et l'analyse de la différence de phase entre les pixels d'une image RSO acquise peu avant ou peu après l'inondation et ceux d'une image acquise durant l'inondation, sur la même orbite (André *et al.*, 2002; Refice *et al.*, 2014). Les zones inondées en eau libre peuvent généralement être identifiées par leur faible corrélation de phase interférométrique, comparativement aux sols nus non inondés, qui eux présentent une forte

corrélation de phase interférométrique. L'humidité du sol restant élevée après le retrait des eaux d'inondation, ces faibles corrélations persistent quelques jours après la fin de l'inondation et permettent ainsi de suivre l'évolution de l'inondation (Refice *et al.*, 2014). Les zones de végétation inondées peuvent être identifiées par leur forte cohérence interférométrique sur une paire d'images acquises peu après ou durant l'inondation, et dont les valeurs se distinguent nettement de celles acquises avant l'inondation, caractérisées par de faibles cohérences interférométriques (Pulvirenti *et al.*, 2015).

Une grande partie des études utilisant l'information de cohérence pour la détection des zones inondées a été réalisée à l'aide de paires de données acquises par la mission tandem ERS-1/2 (1995-1996). Le court intervalle de temps (moins de 24 h) entre les acquisitions des satellites ERS-1 et ERS-2 qui constituent ce tandem a permis l'obtention de données de haute cohérence pour la plupart des zones non inondées. La moyenne résolution spatiale des capteurs semble cependant avoir limité l'utilisation de ces données à la détection des zones d'eau libre et de la végétation inondée. L'arrêt du capteur ERS-1 en 2000 a marqué un ralentissement des études utilisant l'interférométrie RSO pour la détection des zones inondées, le temps de revisite des satellites radar en activité étant alors trop long (ex : 11 jours avec TerraSAR-X) pour permettre de conserver un signal corrélé sur les zones non inondées. Cependant, le lancement des satellites de haute résolution spatiale de la constellation COSMO-SkyMed en 2007 et des satellites constituant la mission TanDEM-X a permis à de nouvelles études, portant notamment sur la détection des zones urbaines inondées à l'aide de l'interférométrie radar, de voir le jour (Hahmann *et al.*, 2010; Refice *et al.*, 2014; Wendleder *et al.*, 2013).

Une des approches largement utilisée pour détecter les zones inondées en eau libre et la végétation inondée à l'aide de l'information de cohérence interférométrique consiste en la création d'une image composite multi-temporelle fausses couleurs, combinant les images de cohérence et celles d'intensité (Buck *et al.*, 2000; Dellepiane *et al.*, 2012; Dellepiane *et al.*, 2000; Geudtner *et al.*, 1996; Refice *et al.*, 2014; Stabel *et al.*, 2003). La méthode utilisée pour interpréter l'image composite créée varie ensuite selon les études. Si certaines optent pour une interprétation visuelle de l'image (Buck *et al.*, 2000; Geudtner *et al.*, 1996; Stabel *et al.*, 2004; Dellepiane *et al.*, 2012), d'autres, comme celle présentée par Refice *et al.* (2014), ont choisi d'identifier les sols inondés sur une série d'images COSMO-SkyMed à l'aide d'une approche de classification bayésienne basée sur l'identification manuelle des rétrodiffusions et des signatures de cohérences représentatives de différents types d'occupations du sol. Enfin, dans Dellepiane

et al. (2000), une classification non supervisée basée sur les champs aléatoires de Markov est utilisée.

Le recours au seuillage est lui aussi fréquent. Dans Nico *et al.* (2000), les plans d'eau libre sont d'abord détectés sur une image de différences d'amplitude extraite d'images ERS-1/2, puis les fortes valeurs d'une image de cohérence sont utilisées pour éliminer les pixels mal classés sur l'image d'amplitude. Dans Hahmann *et al.* (2010) ainsi que dans Wendleder *et al.* (2013), l'extraction des plans d'eau sur une scène TanDEM-X repose également sur une méthode de seuillage, appliquée sur les images d'amplitude et de cohérence, et dont les valeurs des seuils sont fixées manuellement. L'objectif est ici d'extraire un masque des zones d'eau, qui viendra par la suite en support aux opérations d'édition, plus précisément de filtrage et de lissage, des données d'élévation produites par la mission TanDEM-X. Différemment, dans les travaux présentés par Giordano *et al.* (2005), une approche basée sur le concept de la connectivité floue est d'abord utilisée pour extraire les limites des rivières et des lacs hors situation d'inondation sur une image d'amplitude ERS-1. Des noyaux de croissance sont sélectionnés sur ces limites et transférés sur l'image de cohérence issue d'un couple d'images ERS-1/2 représentant l'inondation pour une étape de segmentation par croissance de région. La détection des zones inondées sur l'image de cohérence est alors réalisée à l'intérieur de la zone segmentée à l'aide d'un seuillage manuel.

L'information de cohérence n'est ainsi pas utilisée seule, mais est systématiquement combinée à l'information d'amplitude extraite de l'image RSO acquise avant ou durant l'inondation. Plusieurs études ont montré que l'utilisation combinée de ces deux types d'information permet d'obtenir une détection des zones inondées plus précise que si un seul type d'information est exploité (Dellepiane *et al.*, 2000; Nico *et al.*, 2000).

Rares sont les études qui se sont intéressées à l'utilisation de l'information de cohérence pour la détection des zones urbaines inondées. Cela peut s'expliquer en grande partie par l'absence de paires d'images interférométriques de haute résolution spatiale couvrant une zone d'inondation urbaine. Dans Chini *et al.* (2012), une image composite multi-temporelle fausse couleur est créée en combinant l'information de cohérence et l'information d'amplitude extraites d'images COSMO-SkyMed de très haute résolution spatiale (3 m) acquises 1 et 2 jours après le tsunami ayant touché une ville portuaire japonaise en 2011. L'exploitation des informations d'amplitude et de cohérence interférométrique, couplée à la haute résolution spatiale des images utilisées (10 m), permettent de détecter de manière visuelle les zones urbaines touchées par l'inondation. Dans le but de réduire l'incertitude associée à une évaluation basée uniquement sur

l'information d'amplitude et sur des données de cohérence estimées à l'aide d'une image acquise avant l'inondation et d'une image acquise durant l'inondation, Pierdicca *et al.* (2014) puis Pulvirenti *et al.* (2015) ont choisi d'utiliser l'information de cohérence issue de deux images COSMO-SkyMed acquises hors situation d'inondation et les différences de rétrodiffusion estimées entre une image d'inondation et une image pré-inondation acquises par le même capteur. L'identification des zones urbaines inondées est réalisée en sélectionnant de manière indépendante les pixels de la zone urbaine présentant 1) une diminution de la cohérence entre les deux types de données de cohérence; 2) une diminution de la rétrodiffusion entre l'image d'inondation et l'image pré-inondation; et 3) une augmentation de la rétrodiffusion. Une approche de classification par croissance de région, dont les noyaux et le critère de tolérance sont déterminés par analyse visuelle, est ensuite appliquée à chacune de ces classifications, pour déterminer l'étendue finale des zones urbaines inondées. Les bons résultats obtenus à l'aide d'images relatives à l'inondation de la ville d'Émilie (Italie) en 2014 démontrent que détecter les zones où la cohérence diminue alors que la rétrodiffusion reste relativement stable permet une meilleure classification des zones urbaines inondées que si seules des données d'intensité sont utilisées.

Tout comme pour les méthodes de détection des changements par amplitude, une des limites principales des techniques de détection et de cartographie des zones inondées par analyse des changements de cohérence interférométrique réside en la disponibilité des images. Les constellations de satellites, tels que la constellation COSMO-SkyMed ou les satellites opérant en tandem, comme TanDEM-X, sont encore peu nombreuses et n'opèrent bien souvent que sur demande, ce qui limite la disponibilité d'images d'archives pour un grand nombre de rivières à risque d'inondation.

2.3.7 Les approches contextuelles

De nombreuses études utilisent le pixel comme plus petite composante géométrique de l'image, et le classifient de manière indépendante sur la base de son vecteur d'intensité, sans tenir compte de l'information contenue dans les pixels voisins (Caloz *et al.*, 2001; Martinis, 2010). Les classifications produites par les approches n'utilisant pas l'information de contexte ont ainsi une apparence qualifiée par certains auteurs de « poivre et sel », et dont la cohérence spatiale est diminuée par la présence de nombreux pixels isolés. Cet effet tend à se renforcer avec les images radar de très haute résolution spatiale acquises par la nouvelle génération de capteurs RSO, les détails spatiaux des images étant généralement plus petits que la dimension des

objets imagés (Hahmann *et al.*, 2008; Pulvirenti *et al.*, 2011b). Les variances spectrales à l'intérieur d'une même classe thématique sont alors plus importantes qu'avec une image de basse ou de moyenne résolution spatiale, et résultent en d'importantes confusions inter-classes (Mason *et al.*, 2012a). L'information de contexte, quand elle est correctement comprise et modélisée, s'avère alors être un élément précieux pour améliorer la pertinence des classifications (Blaschke *et al.*, 2014; Mallinis *et al.*, 2011; Pellizzeri *et al.*, 2003; Voigt *et al.*, 2008). Cette information peut être intégrée de diverses manières dans les algorithmes de détection des zones inondées. Une revue détaillée en est donnée dans Martinis *et al.* (2015b).

Dans les travaux présentés par Chini *et al.* (2011) ainsi que dans Pulvirenti *et al.* (2013b), l'information de contexte des pixels d'une série d'images COSMO-SkyMed est prise en compte à l'aide de deux opérateurs dérivés de l'érosion et de la dilatation, à savoir des opérateurs d'ouverture et de fermeture, appliqués aux images d'intensité avec différentes tailles d'éléments structuraux. Les segments créés sont ensuite regroupés par agglomération successive et classifiés à l'aide de la méthode non supervisée des K-moyennes. Enfin, chaque classe est transformée en objets distincts, en tenant compte de la continuité spatiale des objets. L'étiquetage des objets finaux est réalisé en comparant leurs signatures multi-temporelles à celles issues de différents modèles électromagnétiques.

Les cartes auto-organisées de Kohonen (Kohonen, 1995), un type de réseaux de neurones artificiels, ont également été utilisées par Kussul *et al.* (2008; 2011), pour la détection des zones inondées en eau libre sur des images ENVISAT ASAR, ERS-2 et RADARSAT-1. Les pixels nécessaires à l'entraînement et au test des réseaux de neurones pour les classes « eau » et « non eau » sont sélectionnés manuellement à l'aide d'informations auxiliaires sur les plans d'eau dérivées d'images Landsat-7/ETM+ et des données d'occupation du sol disponibles pour la zone étudiée, puis l'image RSO est segmentée à l'aide de la méthode des cartes auto-organisées de Kohonen. Une fenêtre mobile, dont la taille est adaptée à l'image RSO, est utilisée pour la segmentation et permet de tenir compte des connections spatiales entre les pixels de l'image. La classification de chaque neurone est ensuite réalisée sur la base du maximum de pixels de chaque ensemble d'entraînement ayant activé ce neurone.

Cependant, nombreuses sont les études qui ont mis à profit les processus de croissance de région pour la délimitation des zones inondées en milieux urbains et ruraux. De manière générale, la procédure débute avec un noyau de croissance, à savoir des pixels de l'image identifiés comme appartenant à la classe « eau » avec une forte certitude, et élargit ce noyau de manière itérative en y intégrant les pixels voisins ayant des valeurs de rétrodiffusion similaires à

celle du noyau. Le processus est répété à partir du nouveau noyau, jusqu'à ce que plus aucun pixel voisin n'ait de valeur similaire à ceux associés à l'eau libre ou jusqu'à ce qu'un critère de valeur maximale de rétrodiffusion, ou critère de tolérance, soit atteint (Matgen *et al.*, 2011). Une application simple de cette approche a été présentée par Malnes *et al.* (2002). La croissance de région y est utilisée pour affiner la classification de l'eau libre réalisée par un seuillage automatique sur une image RADARSAT-1, en y intégrant les pixels voisins ayant une rétrodiffusion jusqu'à 3 dB supérieure à la moyenne des rétrodiffusions calculées sur une zone d'intérêt sélectionnée manuellement.

Dans une approche présentée initialement par Mason *et al.* (2010) puis reprise par Schumann *et al.* (2011), les noyaux de croissance de région de l'eau libre sont initialisés de manière manuelle. Ils sont sélectionnés sur la base de leurs valeurs de rétrodiffusion et des hauteurs d'eau déterminées dans les zones rurales adjacentes à l'aide d'une approche par modèles de contours actifs, puis sont soumis à une interpolation spatiale par krigeage. Ces régions sont ensuite soumises à un processus itératif de dilatation jusqu'à ce que le nombre de régions connectées commence à très peu varier après chaque itération, puis sont soumises à un processus final d'érosion. Dans Matgen *et al.* (2011), les noyaux de croissance des régions d'eau libre sont sélectionnés de manière automatique à l'aide d'un seuillage radiométrique et sont ensuite dilatés jusqu'à atteindre un seuil de tolérance, fixé au 99^{ème} percentile de la distribution Gamma des rétrodiffusions de l'eau libre. Dans une approche similaire, mais cette fois automatisée, présentée par Giustarini *et al.* (2013) et orientée vers la détection des zones urbaines inondées à l'aide d'images TerraSAR-X de très haute résolution spatiale (3m), ce critère de tolérance est ajusté en tenant compte de l'utilisation d'un masque des valeurs de rétrodiffusion des zones affectées par les phénomènes d'ombre et des zones permanentes ayant une rétrodiffusion de type spéculaire, généré à l'aide d'une méthode de détection des changements. Les résultats obtenus démontrent que 85% des pixels inondés non masqués sont correctement identifiés à l'aide de cette méthode, mais avec des erreurs d'omission de près de 16%. Cette méthode présente à ce jour les résultats les plus précis en matière de détection des zones urbaines inondées, mais n'a pour l'heure pas été testée sur d'autres événements d'inondation, imagés par d'autres capteurs que TerraSAR-X.

Les Modèles de Contours Actifs, aussi appelés « *snakes* » ont également été très largement utilisés pour la délimitation des frontières entre l'eau et la terre sur les images RSO en polarisation simple. Cette approche sophistiquée de croissance de régions, initialement proposée par Kass *et al.* (1988), recherche de manière itérative dans l'image les limites des

objets d'intérêts à l'aide d'un contour dynamique curviligne, dont la déformation évolue sous la contrainte d'une fonction d'énergie. Les paramètres de cette fonction d'énergie sont déterminés de manière empirique. Le contour actif croit jusqu'à rencontrer la position d'énergie minimale, correspondant généralement à un changement net de radiométrie dans l'image. L'objectif est ainsi de produire un contour vectoriel continu lissé d'un groupe homogène de pixels (Henry, 2004). Les Modèles de Contours Actifs sont ainsi adaptés à la segmentation des images RSO affectées par du bruit. Cette approche a été pour la première fois reformulée par Horritt (1999) pour être applicable à la détection des zones inondées sur une image RSO en polarisation simple. L'outil développé prend en compte la distribution statistique du bruit aléatoire des images radar, dont l'intensité suit une loi Gamma, mais aussi les mesures locales de ton et de texture de l'image dans le processus d'évolution des contours actifs. L'application de l'approche reformulée à une image ERS-1 acquise en 1992 lors d'une inondation de la Tamise (Angleterre) a montré une correspondance d'environ 70% entre la segmentation obtenue sur l'image RSO et les limites des zones inondées extraites des photographies aériennes acquises simultanément (Horritt *et al.*, 2001). Cette approche a été exploitée dans de nombreuses études pour la détection des limites des zones inondées en eau libre (Ahtonen *et al.*, 2005; Bates *et al.*, 2006; Horritt *et al.*, 2003; Pappenberger *et al.*, 2007; Schumann *et al.*, 2009a). Par la suite, Mason *et al.* (2007) ont proposé une modification de cet algorithme, permettant au contour actif de ne plus être conditionné uniquement par les mesures d'intensité et de texture de l'image RSO, mais aussi par les élévations extraites de données d'élévation LIDAR. L'utilisation de courbures en 3 dimensions plutôt qu'en 2 dimensions, comme c'était jusqu'alors le cas, permet au contour de varier de manière plus douce dans l'espace et ainsi de limiter les erreurs de positionnement des limites de la zone inondée dues à la présence de végétation en bordure de rivière et de végétation émergente. Appliquée tout d'abord sur des images ERS-1 de l'inondation de la rivière Tamise en 1992, l'approche a prouvé sa pertinence pour la réduction des erreurs de positionnement de la ligne d'eau dans les zones de faible pente et de faible végétation, avec une réduction de l'erreur moyenne quadratique des différences d'élévation de la ligne d'eau de plus de 1,65 m (Mason *et al.*, 2009; Mason *et al.*, 2007). Elle a ensuite été appliquée avec succès pour l'extraction des limites des zones inondées en milieu rural sur des scènes TerraSAR-X acquises durant l'inondation de la rivière Severn (Angleterre), en 2007 (Mason *et al.*, 2010; Schumann *et al.*, 2011).

Malgré ces bons résultats, il convient de souligner deux limites importantes des modèles de contours actifs. D'une part, la méthode nécessite un grand nombre d'interactions de la part de l'utilisateur, puisque les nœuds de croissance de la ligne de contour doivent être initialisés

manuellement pour permettre l'obtention de bons résultats et cela de manière individuelle pour chaque région inondée de l'image. D'autre part, et c'est là leur plus importante limite, les modèles de contours actifs ne sont pas adaptés à la délimitation des zones inondées dans les rues étroites (d'autant plus si ces zones apparaissent comme isolées à cause du phénomène de déversement), ni à leur intégration aux limites finales de l'inondation. Leur utilisation n'est donc pas appropriée pour la délimitation des zones urbaines inondées (Néelz *et al.*, 2006). Ainsi, dans ces environnements, Mason *et al.* (2012a), Mason *et al.* (2010) ainsi que Schumann *et al.* (2011) lui ont préféré des approches plus basiques de croissances de région. Comme souligné par Martinis *et al.* (2015a), les modèles de contours actifs géométriques, qui s'adaptent aux changements de topologie (fusion, séparation des zones d'eau, etc.) et permettent ainsi de détecter simultanément plusieurs objets d'eau, pourraient être une alternative intéressante, bien qu'ils n'aient été appliqués pour le moment qu'aux zones rurales (par exemple Silveira *et al.*, 2009).

Finalement, les analyses orientées-objets des images satellitaires ont gagné en importance au cours des dernières années (Benz *et al.*, 2004; Blaschke, 2010; Meinel *et al.*, 2003). Les approches orientées-objets sont basées sur le principe qu'une information importante nécessaire à l'analyse et à la classification de l'image n'est pas toujours représentée par des pixels individuels, mais plutôt dans des segments homogènes de l'image et dans leurs relations mutuelles (Benz *et al.*, 2004; Blaschke *et al.*, 2014). Les objets sont créés par le regroupement successif de pixels voisins sur des critères de similarité, tels que leur caractéristiques spectrales, leur forme ou encore leur texture. On obtient alors un réseau d'objets vectoriels sans étiquette, qui peuvent ensuite être classifiés selon divers critères choisis par l'utilisateur (taille, forme, texture, contexte, etc.). Quelques approches de segmentation orientées-objets ont été intégrées aux approches de détection des zones inondées à l'aide de l'imagerie RSO. Une des plus fréquemment utilisée est l'approche de segmentation par évolution de fractales nettes (ou *Fractal Net Evolution*), proposée par Baatz *et al.* (1999). Cette approche emploie une technique de segmentation itérative vers le haut basée sur la fusion par paire des régions adjacentes, et permet donc une représentation multi-échelle des données. Le processus de fusion des régions est dirigé par un algorithme de meilleur ajustement local mutuel, dont le but est de limiter l'hétérogénéité des objets en regroupant deux régions adjacentes séparées par la distance la plus courte dans un espace d'attributs déterminés par des caractéristiques spectrales et texturales moyennes, déterminées par l'utilisateur. Cette méthode, souvent désignée sous le terme de segmentation « multi-résolution », a été utilisée dans plusieurs études pour la segmentation des images RSO d'inondations en objets. A chaque fois, l'algorithme utilisé est

l'algorithme de segmentation multi-résolution disponible dans le logiciel commercial Definiens eCognition. Dans les travaux présentés par Mallinis *et al.* (2011), il a été utilisé pour la segmentation d'images ENVISAT ASAR (polarisation VV), dans une approche visant à détecter les zones inondées à grande échelle sur un bassin versant rural transfrontalier. Les paramètres de la segmentation sont là encore déterminés de manière empirique. Les zones inondées en eau libre sont ensuite identifiées à l'aide d'une approche de classification supervisée par logique floue. Dans Martinis *et al.* (2009; 2011), la segmentation orientée-objets est utilisée dans le but d'améliorer les résultats de classification des zones inondées issues d'un seuillage global sur des images TerraSAR-X en polarisation HH à dominante rurale, mais présentant également des zones urbaines inondées. Le processus de segmentation, dont les paramètres sont déterminés par essais et erreurs, est tout d'abord appliqué à grande échelle. Les objets créés sont alors classifiés à l'aide du seuil global estimé lors des premières étapes de la méthodologie. La segmentation est ensuite appliquée à moyenne échelle puis à petite échelle dans un voisinage de respectivement cinq objets et un objet des objets précédemment classifiés comme inondés. Le seuil global est ensuite appliqué à l'intérieur de ces objets, afin d'intégrer à la classification les zones inondées n'ayant pas pu être identifiées à l'aide d'une analyse à grande échelle. Une approche relativement similaire a été utilisée dans Mason *et al.* (2012a) pour affiner la détection des zones inondées en milieu urbain, initialisée à l'aide d'une approche de segmentation par croissance de régions sur une image TerraSAR-X en mode StripMap (polarisation HH). Les zones d'ombre et de déversement, précédemment identifiées, ainsi que les zones non classifiées en milieux urbains sont segmentées puis classifiées : les objets ayant une élévation inférieure à une ligne d'eau, dont la hauteur maximale a été extraite de la classification des zones rurales inondées, et partageant une bordure de quelques pixels avec des zones urbaines déjà identifiées comme inondées sont inclus dans la classification des zones urbaines inondées.

2.3.8 L'utilisation de données auxiliaires

Les difficultés liées à la détection des zones inondées en milieux urbains et ruraux à l'aide de l'imagerie RSO ont mené à l'utilisation de plus en plus fréquente, voire systématique, de données auxiliaires dans les algorithmes de détection, dans le but d'améliorer ou de supporter les processus de cartographie des zones inondées.

Quelques études ont par exemple utilisé des modèles électromagnétiques afin d'aider à l'interprétation du signal rétrodiffusé sur des images RSO présentant des zones inondées et ainsi d'améliorer l'identification des zones inondées. Sur la base d'orientations proposées par

Boni *et al.* (2007), les études présentées par Chini *et al.* (2011) et par Pulvirenti *et al.* (2011a) ont utilisé le modèle électromagnétique TOV, développé par l'université Tor Vergata de Rome, pour simuler les signatures de rétrodiffusion de zones agricoles inondées avec différents stades de croissance des cultures, pour un milieu méditerranéen. Ces simulations ont ensuite été comparées aux signatures multi-temporelles des segments créés sur une série d'images COSMO-SkyMed (mode Spotlight, polarisation HH). Une approche de classification par K-moyennes a ensuite été appliquée à ces segments, afin d'identifier leur type d'occupation du sol et leur statut (inondé/non inondé). Une méthode assez similaire a été employée par Pulvirenti *et al.* (2013b). Trois modèles électromagnétiques sont intégrés à une classification basée sur la logique floue pour aider à l'interprétation des signatures de rétrodiffusion multi-temporelles de zones agricoles, forestières et urbaines en situation sèche et en situation d'inondation. Des données d'occupation du sol (à savoir des données CORINE) sont utilisées pour déterminer à quel type d'occupation du sol les segments de l'image RSO appartiennent. Cette approche de classification par logique floue, qui intègre également des considérations hydrauliques, de texture et de contexte, a été testée sur une série multi-temporelle d'images COSMO-SkyMed (mode Stripmap, polarisation HH) d'une inondation en Albanie. Selon les auteurs, qui ne fournissent pas de statistiques précises sur les résultats obtenus, la cartographie de l'inondation s'accorde généralement avec celles dérivées d'images optiques.

Les données d'occupation du sol, telles que celles exploitées par Chini *et al.* (2011); Pulvirenti *et al.* (2011a) et Pulvirenti *et al.* (2013b), sont très peu utilisées dans les approches de détection des zones inondées par imagerie RSO. Ainsi, seuls les travaux de Macina *et al.* (2006) et de Pierdicca *et al.* (2008), qui exploitent les principes de la logique floue pour la classification des zones inondées, mettent à profit ce type de données. La méthode développée par ces auteurs, les données utilisées ainsi que les résultats obtenus ont été présentés à la section 2.3.4.

Différemment, dans le but de limiter les erreurs de détection dues aux effets d'ombre et de déversement en zones urbaines, Mason *et al.* (2010) ont choisi d'utiliser un simulateur de bout-en-bout (SETES) (Speck *et al.*, 2007), exécuté conjointement avec un modèle numérique de surface (MNS) LIDAR de très haute résolution spatiale de la ville de Tewkesbury (Royaume-Uni), pour générer une cartographie des zones d'ombre et de déversement pouvant affecter une image TerraSAR-X (mode StripMap, polarisation HH, angle d'incidence de 24°) acquise lors de l'inondation de la ville en juillet 2007. Cette carte permet de masquer les zones d'ombre et de déversement durant le processus de détection automatique des zones urbaines et rurales inondées, et ainsi de limiter de manière importante les erreurs de commission et d'omission

généérées par ces zones. Les auteurs soulignent ainsi qu'en appliquant ce masque, 75% des pixels inondés en zone urbaine sont correctement classifiés à l'aide de la méthode proposée, avec un taux d'erreurs de commission de 24%. Ces taux chutent à 58% et 19%, respectivement, si tous les pixels de l'image sont considérés dans la classification. Comme souligné dans la section 2.3.4, une approche différente, mais limitée uniquement aux zones affectées par les ombres et aux zones ayant une rétrodiffusion spéculaire permanente, a été proposée par Giustarini *et al.* (2013). Ces zones sont détectées à l'aide d'un seuillage appliqué sur les différences de coefficients de rétrodiffusion entre une image TerraSAR-X StripMap, elle aussi acquise durant l'inondation de la ville de Tewkesbury en 2007, et une image de référence. Ces zones sont ensuite masquées durant le processus de détection automatique des zones urbaines inondées, basé sur les travaux de Matgen *et al.* (2011).

Si l'application de ces masques permet de limiter les erreurs de commission, elle résulte également en l'absence d'identification du statut d'inondation (ou de non-inondation) d'un grand nombre de pixels. Dans l'étude présentée par Mason *et al.* (2010), ce masque représente une surface de près de 1 km², soit environ 39% de la superficie de la zone étudiée. Cela n'est en aucun cas négligeable, et peut être considéré comme une limite importante à l'utilisation de tels masques.

Plus récemment, Mason *et al.* (2014) ont présenté une approche permettant d'exploiter l'information de double rétrodiffusion entre la surface au sol et les murs des bâtiments adjacents en situation d'inondation, et ainsi d'améliorer la détection des pixels inondés dans les zones de l'image RSO affectées par le phénomène de déversement. Sur la base des travaux de Mason *et al.* (2010), le simulateur RSO SETES est exécuté en conjonction avec des données MNS LIDAR de la ville de Tewkesbury, pour estimer de manière automatique la position des sections équivalentes de double rétrodiffusion des bâtiments sur l'image radar. Les mesures réalisées au niveau de ces sections efficaces en zones inondées sont ensuite comparées aux prédictions d'un modèle de rétrodiffusion électromagnétique (le modèle GO-GO développé par Franceschetti *et al.*, 2002), pour le cas d'une image mono-temporelle TerraSAR-X contenant des zones inondées, et pour le cas d'images multi-temporelles, pour lesquelles les différences de forces de rétrodiffusion par double rebond extraites des sections équivalentes sont comparées. Si l'approche doit encore être validée sur d'autres événements d'inondations et sur des images acquises avec différents paramètres d'acquisition, les premiers résultats, issus de tests réalisés sur de petites surfaces des images test, sont prometteurs. Dans le cas de l'image mono-temporelle comme dans celui des images multi-temporelles, les courbes de double

rétrodiffusion d'inondation ont été détectées avec une précision proche de 100%, et avec une précision de 91% dans le cas des courbes de double rétrodiffusion en situation sèche.

Cependant, parmi les données auxiliaires intégrées aux algorithmes de détection des zones inondées, les données d'élévation ont été les plus largement mises à profit, et cela avec des objectifs divers. Plusieurs auteurs ont choisi d'exploiter des données d'élévation dans le but de limiter les erreurs de détection des surfaces d'eau libre dues aux effets de la topographie, et en particulier aux zones d'ombre causées par de fortes pentes dans les zones de relief (Andreoli *et al.*, 2007; Cossu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2014; Solbø *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2007; Voigt *et al.*, 2008). Dans la majorité de ces études, les zones d'ombre sont estimées à l'aide d'un calcul de pente réalisé à partir des données d'élévation, et sont masquées durant les processus de détection des zones d'eau libre, ou au cours d'une phase d'affinement de la classification. Néanmoins, dans les travaux présentés par Song *et al.* (2007), l'angle d'incidence local de la surface par rapport à l'image SAR et la direction azimutale sont utilisés pour localiser les zones de l'image SAR susceptibles de subir des distorsions radiométriques dues aux effets topographiques. Ces zones de distorsions sont ensuite corrigées de 6 dB sur l'image RSO. Une classification supervisée par maximum de vraisemblance est ensuite utilisée pour classifier les zones d'eau libre sur les images RADARSAT-1 disponibles.

Dans d'autres études, les données d'élévation sont intégrées à des processus visant à affiner ou à ajuster la délimitation des zones d'eau libre inondées. Ainsi, pour limiter les erreurs de délimitation des zones inondées dues à la présence de végétation, Mason *et al.* (2012b) ont utilisé des données LIDAR d'élévation d'une précision verticale de 0,1 m pour estimer les élévations de la végétation présente en bordure des plans d'eau inondés détectés sur une image TerraSAR-X. Les élévations maximales de la ligne d'eau en zone rurale sont ensuite corrigées en y ajoutant les élévations de la végétation basse. La position de la ligne d'eau sous la végétation ne pouvant pas être définie de manière fiable, l'amélioration de la précision de la délimitation à l'aide de cette approche n'est pas évidente: l'augmentation moyenne des niveaux d'eau est de 0,48 m, avec cependant une déviation standard de cette augmentation de 0,54 m.

Enfin, plusieurs études ont choisi d'utiliser les données d'élévation dans le but d'aider à la détection des zones d'eau, en combinant l'information de rétrodiffusion des images RSO d'inondation à une information à caractère hydraulique, dérivée de la topographie du bassin versant étudié. Les travaux présentés par Brivio *et al.* (2002) se donnaient ainsi pour objectif d'estimer l'étendue maximale d'un événement d'inondation imagé par le capteur ERS-1 trois jours après le pic d'une inondation ayant eu lieu dans une région italienne à dominante rurale, à

l'aide de la position des plans d'eau stagnante encore observables sur l'image, et détectés par seuillage manuel. Une matrice de moindre distance-coût cumulée est ensuite estimée à l'aide de données topographiques au 1 :10 000. Chaque cellule de cette matrice est caractérisée par une valeur égale au moindre coût cumulé que l'eau doit dépenser pour atteindre la cellule la plus proche située sur le chenal principal de la rivière. Cela correspond à l'énergie nécessaire à l'eau pour dépasser les résistances formées par les éléments naturels et anthropiques, comme la topographie, la rugosité de surface, la végétation ou encore l'occupation du sol, pour atteindre une cellule de hauteur inférieure. Dans cette étude, la matrice de moindre distance-coût cumulée est estimée uniquement à l'aide de paramètres relatifs à la distance entre les cellules, à la topographie et à la topologie de surface. Les autres paramètres influençant la résistance de surface étant difficiles à modéliser, la topologie de la surface est supposée constante sur toute la zone, et égale à 1. Les cellules de la matrice correspondant aux cellules inondées détectées sur l'image ERS-1 sont considérées comme les limites de l'inondation : la valeur-coût de la cellule inondée la plus éloignée du chenal principal de la rivière est sélectionnée comme seuil. Toutes les cellules ayant une valeur-coût inférieure à ce seuil sont alors sélectionnées et considérées comme inondées dans la carte finale d'inondation. La carte des zones inondées obtenue est précise, près de 96% des pixels classifiés comme inondés sur des photographies aériennes acquises lors du maximum de l'inondation ayant été correctement identifiés grâce à cette méthode.

Les travaux présentés par Macina *et al.* (2006) et par Pierdicca *et al.* (2008), dont il a déjà été question précédemment, exploitent également les données d'élévation du sol pour prendre en compte des considérations hydrauliques simples relatives à la dépendance des probabilités d'inondations aux caractéristiques de surface. Ces considérations sont intégrées à une méthode hybride combinant la détection des changements de rétrodiffusion et la classification par logique floue, à l'aide de fonctions d'appartenance spécifiques. La classification des zones inondées tient ainsi compte de la forte probabilité d'occurrence d'une inondation dans les zones de faibles altitudes, ainsi que des fortes probabilités de retrouver des surfaces inondées dans les zones de faible pente et dans les zones concaves, détectées à l'aide d'un modèle numérique d'élévation. De la même manière, l'information de contexte des pixels, que l'on peut considérer comme relative à la connectivité hydraulique, a été intégrée à la méthode à l'aide d'une série de fonctions d'appartenances. Par exemple, une fonction d'appartenance relative à la faible probabilité de présence d'un pixel inondé isolé à l'intérieur d'une zone de pixels non inondés (et inversement) a été développée, de même qu'une fonction d'appartenance relative à la probabilité de présence d'un pixel inondé proche de pixels non inondés situés à une plus faible

altitude. Testée à l'aide d'images ERS-1 acquises lors de l'inondation de la rivière Tanaro (Italie) en 1994 et d'un MNT d'une résolution de 40 m, l'approche a permis de classifier correctement 87% des pixels identifiés comme inondés sur les données de vérité terrain, avec un taux d'erreurs de commission de 5%. L'approche se limite cependant à la détection des zones d'eau libre, et aucun résultat relatif à la détection des pixels inondés en zone urbaine n'est présenté.

Cette approche a par la suite été utilisée dans des études publiées par Pierdicca *et al.* (2010) et par Pulvirenti *et al.* (2011a), qui ont ajouté des fonctions d'appartenance permettant de tenir compte de la proximité des pixels à un plan d'eau permanent (rivières, lacs, réservoirs, etc.) et de l'élévation des pixels par rapport au chenal principal de la rivière. Selon les auteurs, si une rivière sort de son lit, la probabilité d'inondation est importante pour les pixels situés à proximité de la rivière et à une altitude qui n'excède pas celle du chenal de la rivière. Cela permet d'éviter les erreurs de classification des pixels inondés dans les zones éloignées des plans d'eau ou dans les zones où le relief est prononcé. L'approche, testée à l'aide d'images COSMO-SkyMed acquises en mode StripMap lors d'une inondation ayant eu lieu en Albanie en 2010 et de données d'élévation dérivées de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 30 m, permet une classification relativement précise des zones d'eau libre, des forêts inondées et de la végétation inondée. Aucune information n'est cependant donnée sur la précision de la classification en zone urbaine, même si ce type d'occupation du sol est pris en compte dans l'approche.

Finalement, dans une approche développée par Mason *et al.* (2011) et mise à profit par la suite par Mason *et al.* (2012b), la détection des zones urbaines inondées est guidée par la connaissance des élévations locales de la ligne d'eau dans les zones rurales adjacentes. On suppose ainsi que la hauteur de la ligne d'eau en zone urbaine ne devrait pas être située à une élévation substantiellement supérieure à celle estimée en zone rurale. Les pixels servant de noyaux de croissance à une approche de classification par croissance de région en zone urbaine sont ainsi identifiés à l'aide de leur coefficient de rétrodiffusion mais aussi de leurs élévations. Pour être sélectionnés, les pixels classifiés comme inondés à l'aide d'une approche de classification bayésienne doivent être situés à une altitude inférieure ou égale à la hauteur maximale de la ligne d'eau estimée dans les zones rurales adjacentes.

Un des aspects relatifs à l'intégration de considérations hydrauliques aux approches de détection et de classification des zones inondées qu'il convient de mettre en relief est que cette intégration ne se fait que par l'intermédiaire de données d'élévation, dont seules des informations à caractère hydraulique implicite peuvent être extraites. On a ainsi noté que les

considérations hydrauliques utilisées sont restreintes à de simples analyses d'élévation, de proximité ou encore de connectivité. De plus, si ces considérations permettent d'améliorer la détection des zones inondées en eau libre et éventuellement dans les zones de végétation ou de forêt, elles restent largement insuffisantes pour être applicables en zones urbaines, où la dynamique de l'inondation est gouvernée par un grand nombre de facteurs tels que la présence de bâtiments, de murs, de volumes de stockage, etc. A notre sens, aucune étude ne présente à ce jour d'exemple d'intégration de données à caractère hydraulique explicite (ex : données relatives aux écoulements de surface dans la zone étudiée, aux récurrences d'inondation ou encore aux limites des zones) dans une approche de cartographie des zones inondées basée sur l'imagerie RSO.

2.3.9 Méthodes d'extraction des hauteurs d'eau dans les zones inondées

Les données de hauteurs d'eau dans les zones inondées sont considérées par de nombreux auteurs comme des éléments indispensables à une évaluation précise du risque (Hostache *et al.*, 2005; Koks *et al.*, 2015a). Au cours des vingt dernières années, plusieurs méthodes ont ainsi été développées afin d'estimer ces données.

Une des méthodes les plus simples a été présentée par Oberstadler *et al.* (1997). Les élévations aux extrémités des zones inondées, obtenues par l'interprétation visuelle d'images ERS-1 d'une résolution spatiale de 30 m, sont déterminées par inspection visuelle des isolignes d'une carte topographique au 1:5000, sur laquelle la carte des zones inondées a été superposée. Les élévations de la ligne d'eau sont extraites tous les 500 m environ, sur une longueur de 19 km. Elles sont ensuite comparées à des données mesurées sur le terrain, 24 h après l'acquisition de l'image radar. En tenant compte de la baisse des niveaux d'eau estimée à 54 cm entre le moment de l'acquisition de l'image ERS-1 et les mesures sur le terrain, les auteurs considèrent que les erreurs d'estimation des niveaux d'eau sont de 10 cm à 50 cm. Compte tenu de la résolution spatiale des données utilisées, cela peut être considéré comme relativement précis. Les erreurs d'estimation les plus importantes sont notées dans les zones de végétation et dans les zones urbaines, où les limites de l'inondation n'ont pas pu être définies avec précision. Une des limites majeures de cette méthode est qu'elle ne permet d'obtenir que les élévations de l'eau aux extrémités de la zone inondée, et pas les hauteurs d'eau dans la zone inondée.

Une approche identique a par la suite été utilisée par Brakenridge *et al.* (1998) pour extraire les niveaux d'eau de zones inondées détectées sur une image ERS-1 acquise durant l'inondation de la vallée supérieure du Mississippi, en 1993. La méthode est cependant modifiée pour tenir compte de la précision de positionnement et d'élévation des lignes de contours. Malgré cela, les niveaux d'eaux estimés présentent des erreurs d'estimation de plus de 2 m avec les niveaux d'eau estimés par un modèle hydraulique 1D, et utilisés comme données de validation.

Dans Zwenzner *et al.* (2009), les niveaux d'eau en zones inondées sont extraits de sections transversales positionnées manuellement à travers la section de rivière inondée, à l'aide de données LIDAR d'une précision verticale de 0,1 m et d'une résolution horizontale de 2 m. Afin d'éviter les erreurs de classification dues aux phénomènes d'ombre et de déversement sur l'image RSO, les sections dont les niveaux d'eau ont des valeurs supérieures à plus de 2 m de celle de l'élévation moyenne du profil d'inondation sont exclues. Après un processus de nivellement des élévations de l'eau aux bords droits et gauches des sections, un profil longitudinal de niveau d'eau est créé à partir des niveaux d'eau extraits de chaque section. Ceux-ci sont ensuite corrigés sur l'ensemble de la séquence longitudinale à l'aide d'une moyenne mobile, dans le but d'obtenir une surface d'eau lisse qui servira de niveau d'eau de référence pour la délimitation finale des zones inondées, et l'extraction des hauteurs d'eau dans ces zones. Cette approche a été testée à l'aide d'une image TerraSAR-X (polarisation HH, résolution spatiale de 3 m), acquise durant l'inondation de la rivière Severn (Royaume-Uni) en 2007. Les résultats obtenus ont été comparés aux hauteurs d'eau générées à partir des limites de l'inondation délimitées manuellement sur des orthophotographies acquises 15 h avant l'acquisition de l'image TerraSAR-X et des données LIDAR précédemment mentionnées. Ces résultats ont permis de révéler certaines des limites de la méthode proposée. Encore une fois, la présence de végétation inondée en bordure de rivière, non détectable à l'aide d'une approche simple de seuillage, tend à fausser les estimations des limites de l'inondation et ainsi des niveaux d'eau. Les sections transversales affectées doivent alors être retirées manuellement. De plus, les auteurs soulignent, et c'est là une limite importante, que l'approche ne fonctionne pas en zone urbaine, où les limites des zones inondées sont difficiles à détecter, ainsi qu'en présence de fortes pentes créant des effets d'ombres.

Plusieurs études ont porté un intérêt important à la réduction des erreurs d'estimation des hauteurs d'eau liées à la position des limites des zones inondées extraites d'images RSO, mais aussi aux incertitudes altimétriques des données d'élévation. Par exemple, Horritt *et al.* (2003) ont proposé une approche visant à diminuer les erreurs d'estimation des hauteurs d'eau dues à

la présence de végétation en zone intertidale, sur des images radar aéroportées de très haute résolution spatiale (<1,5 m) en bande C (polarisation VV et VH) et L (polarisation HH, VV et VH). Les auteurs exploitent pour cela l'augmentation d'environ 1,2 dB de la végétation inondée sur les images en bande C, et la différence de phase de 180° entre les polarisations HH et HV en bande L, toutes deux caractéristiques du mécanisme de double rebond entre la surface de l'eau et la végétation inondée. Trois approches sont proposées. La première approche, appliquée aux images en bande C, consiste à délimiter la végétation non inondée dans la zone intertidale et les zones d'eau libre, à l'aide d'une approche par modèle de contours actifs statistiques (voir section 2.3.7). Les élévations aux limites inférieures de la végétation inondées sont ensuite extraites de données LIDAR d'une précision verticale de 15 cm et d'une résolution horizontale de 3 m. La seconde approche consiste en l'application d'un filtre médian sur une image de différence de phase entre les polarisations HH et HV des images en bande L, puis en l'application d'un seuil, positionné entre les valeurs médianes de la végétation inondée et de la végétation non inondée, soit à 75°. L'eau libre est identifiée à l'aide d'un seuil unique, à -15 dB, sur l'image en bande L et en polarisation HH. Enfin, la troisième approche cherche à corriger les hauteurs d'eau dans la zone intertidale en estimant la différence entre le signal du sol et le signal de la canopée de la végétation inondée, détectée à l'aide d'une approche par contours actifs. Ces valeurs sont ensuite ajoutées aux élévations de la limite de l'eau libre extraite de l'image RSO. Les résultats obtenus ont été comparés à des données de validation dérivées des hauteurs de marées enregistrées au moment de l'acquisition des images radar. Les deux premières approches présentées permettent d'améliorer l'erreur de positionnement de la ligne d'eau de 120 cm à 70 cm environ. La troisième approche permet de réduire l'erreur systématique d'estimation des élévations de la surface d'eau de 20 cm à 5 cm environ, mais aucune amélioration de l'erreur aléatoire ne semble être observée. Les auteurs soulignent cependant que l'erreur de positionnement de la ligne d'eau reste trop importante compte tenu de la très haute résolution spatiale des images. Des améliorations devraient donc être apportées à ces méthodes. De plus, ces méthodes ne sont pas automatisées, et requièrent certains d'ajustements manuels.

Hostache *et al.* (2009) se sont intéressés à la réduction de l'incertitude des niveaux d'eau sur l'ensemble de la zone inondée, détectée à l'aide d'images ASAR (ENVISAT). Un nettoyage manuel est tout d'abord réalisé sur les limites de la zone inondée, afin d'en ôter toutes les zones pouvant être la source d'incertitudes radiométriques, telles que les zones de végétation haute, de forte pente ou encore les zones bâties. Les élévations de l'eau aux extrémités de la zone inondée sont ensuite modifiées, en élargissant leurs intervalles de valeurs de ± 15 cm, soit

l'incertitude altimétrique des données LIDAR utilisées (résolution spatiale de 2 m, précision verticale de 15 cm). Afin de limiter l'indépendance des niveaux d'eau estimés à des sections transversales positionnées sur toute la longueur de la rivière, la méthode d'estimation des niveaux d'eau est améliorée par un algorithme de cohérence hydraulique développé par Raclot *et al.* (2003) pour l'estimation des niveaux d'eau à partir d'images aériennes. Cet algorithme est basé sur une loi simple, qui considère que l'énergie hydraulique diminue d'amont en aval. Cette loi hydraulique est simplifiée en une diminution des niveaux d'eau dans la direction de l'écoulement, applicable pour une rivière de faible vitesse d'écoulement comme la rivière Alzette (Luxembourg), qui est à l'étude. L'algorithme force la diminution des niveaux d'eau maximaux de l'amont vers l'aval et l'augmentation des niveaux d'eau minimaux d'aval en amont. Ces niveaux d'eau contraints ont été comparés à des données de validation basées sur des marques de hautes eaux, relevées sur le terrain, et à l'élévation du fond de la rivière. Les incertitudes moyennes de ces niveaux d'eau sont estimées à ± 54 cm, ce qui représente une amélioration importante par rapport aux incertitudes liées aux niveaux d'eau non contraints, estimées à ± 88 cm. Une des limites de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir un profil longitudinal de niveau d'eau, mais ne semble pas permettre l'estimation des niveaux d'eau en tout point de la zone inondée. Elle est donc plus adaptée à la réduction de l'incertitude de modèles hydrauliques, ce qui est d'ailleurs l'objectif de l'étude présentée, qu'à l'évaluation des risques liés aux inondations.

Différemment, dans une étude présentée par Matgen *et al.* (2007a), deux méthodes de cartographie des hauteurs d'eau en zone inondées, à savoir une méthode utilisant les réseaux triangulés irrégulier (ou TIN pour *Triangulated Irregular Network*) et une méthode basée sur une analyse de régression multiple, sont présentées et comparées. Toutes deux utilisent en intrants les élévations aux limites droite et gauche de sections transversales superposées à une carte des zones inondées, dérivées d'une image ASAR (ENVISAT) acquise durant l'inondation de la rivière Alzette (Luxembourg). Ces valeurs d'élévations sont extraites de données LIDAR d'une résolution horizontale de 2 m et d'une précision verticale de 0,1 m. Dans l'approche utilisant les TIN, la moyenne des valeurs d'élévation de l'eau estimées aux extrémités gauches et droites de chaque section transversale est appliquée à toute la section. Puis, pour chaque région entre deux sections transversales, les valeurs d'élévation de la surface d'eau sont interpolées de manière linéaire. On obtient ainsi un TIN représentant la surface de l'eau au moment de l'inondation. Les élévations de cette surface sont ensuite soustraites des élévations du sol, obtenues grâce à un modèle de terrain généré par TIN, ce qui permet d'obtenir les hauteurs d'eau dans la zone inondée. La méthode d'analyse de régression multiple tente de mieux

représenter la tendance générale à la diminution des élévations de la surface de l'eau d'amont en aval du cours d'eau. L'objectif de l'analyse par régression multiple est de décrire la relation entre deux variables indépendantes, à savoir les coordonnées x et y des extrémités de sections transversales positionnées le long de la zone inondée détectée sur l'image RSO, et la variable dépendante, à savoir le niveau d'eau H. Ces niveaux d'eau sont extraits des données LIDAR précédemment mentionnées. Une fois ces informations générées, la régression linéaire est appliquée afin d'ajuster une surface d'eau linéaire à travers le nuage de points des données de niveau d'eau extraites de la classification RSO. Les niveaux d'eau extraits à l'aide de ces deux méthodes ont été comparés aux élévations des marques de hautes eaux relevées sur le terrain, et aux données de niveau d'eau produites par le modèle de simulation hydraulique HEC-RAS. La méthode des TIN est moins précise, et présente un RMSE des élévations des surfaces d'eau générées de près de 0,7 m, alors que celle basée sur les régressions multiples permet des estimations plus précises, avec un RMSE de 0,4 m. Les auteurs soulignent cependant que dans le cas de zones avec de nombreuses infrastructures hydrauliques, ou de méandres importants, la supposition de linéarité des méthodes n'est plus acceptable. Les contraintes associées à la pente ou au changement d'orientation devraient alors être modifiées.

Sur la base de ces travaux, Schumann *et al.* (2007) ont proposé une approche combinant la méthode des TIN et un modèle de régression multiple pour l'extraction des hauteurs d'eau en zone inondées, appelée REFIX (pour *Regression and Elevation-based Flood Information Extraction*). A l'inverse des travaux présentés par Matgen *et al.* (2007a), qui utilisent un modèle de régression linéaire multiple, la ligne d'eau d'inondation le long de la rivière est ici estimée à l'aide d'un modèle de régression linéaire simple, dont la variable dépendante est la hauteur d'eau à chaque section transversale, superposée à la cartographie des zones inondées extraite d'une image RSO. La variable indépendante est la distance entre la première section transversale placée sur le chenal et la section considérée, située en aval. Pour générer une ligne d'eau précise sur les rivières dont les processus d'écoulement sont complexes ou dont l'écoulement interagit avec une infrastructure comme un barrage, le modèle de régression linéaire doit être adapté, en utilisant notamment une analyse de régression linéaire ou non linéaire par morceaux. Le TIN est ensuite créé : pour chaque section transversale, les niveaux d'eau sont calculés à l'aide d'une analyse par régression multiple, utilisant les coordonnées x et y extraites de l'image RSO comme variable dépendante. La ligne d'eau est interpolée de manière linéaire entre les sections croisées successives. On obtient finalement les profondeurs d'inondation en soustrayant les données numériques d'élévation du sol des hauteurs d'eau générées par TIN. Le modèle REFIX a été testé sur deux sections de rivières inondées. Le

premier test a été réalisé sur la rivière Alzette, une rivière relativement large et plate, pour laquelle une image d'inondation ASAR (polarisation VV-HH, résolution spatiale de 30 m) et des données LIDAR d'une résolution horizontale de 2 m et d'une précision verticale de ± 15 cm sont disponibles. Les hauteurs d'eau obtenues présentent un RMSE de 18 cm quand elles sont comparées à des simulations de hauteurs d'eau extraites du modèle HEC-RAS et de 16 cm quand elles sont comparées à des relevés réalisés sur le terrain. Le second site test est la rivière Moselle, une rivière très large et sinueuse et le long de laquelle des infrastructures sont présentes. Pour ce site, des images RADARSAT-2 (polarisation HH, résolution spatiale de 30 m), et un MNT d'une résolution horizontale de 7 m et d'une précision verticale de ± 25 cm, étaient disponibles. Les hauteurs d'eau obtenues présentent un RMSE de 31 cm quand elles sont comparées à des simulations de hauteurs d'eau extraites du modèle HEC-RAS. Ces erreurs plus importantes d'estimation des niveaux d'eau sont en partie dues à la présence de végétation le long de la rivière, qui occasionne des erreurs de positionnement de la ligne d'eau, mais aussi aux résolutions verticales et horizontales plus grossières des données d'élévation utilisées. Les auteurs insistent ainsi sur le fait que des données d'élévation de haute résolution spatiale et d'une précision d'au moins 0,5 m sont appropriées pour l'étude de petites rivières hétérogènes, alors que dans le cas de rivières plus homogènes et plus larges, un MNT de plus faibles résolutions horizontale et verticale peut donner des résultats corrects. Cela a été confirmé par la suite par les études présentées dans Schumann *et al.* (2008) et dans Schumann *et al.* (2010b), qui ont appliqué le modèle REFIX sur différents scénarios d'inondation à l'aide de données LIDAR d'élévation, de données de contours topographiques et de données SRTM.

Les études qui s'intéressent de manière spécifique à l'estimation des hauteurs d'eau dans les zones urbaines inondées sont rares. A ce jour, seuls Iervolino *et al.* (2015) proposent deux approches permettant d'estimer les hauteurs de submersion en milieu urbain, et qui diffèrent grandement de celles déjà présentées. L'approche SIObA (pour *Single Image Object Aware*) permet d'estimer la hauteur de submersion pour un bâtiment particulier à l'aide d'une unique image RSO acquise durant ou peu après l'inondation. L'approche TIArA (pour *Two Images Area Aware*) permet d'estimer les hauteurs d'eau à l'échelle plus globale de la zone urbaine inondée. Elle repose sur un couple d'images RSO (une image acquise avant l'évènement et une image acquise durant l'évènement ou peu après) superposées et calibrées. Ces deux méthodes, à l'heure actuelle non automatisées, sont basées sur l'utilisation de modèles théoriques de rétrodiffusion, permettant de lier la section équivalente radar d'une zone de déversement à la hauteur du bâtiment qui en est la source. Ces modèles théoriques ont été adaptés au cas de contribution par double réflexion du signal radar en situation d'inondation et ont été inversés.

L'application de ces modèles aux images d'inondation disponibles nécessite la connaissance a priori d'un certain nombre de caractéristiques du bâtiment et du sol, à savoir les constantes diélectriques du sol et de l'eau, l'angle entre la ligne de visée du capteur et la projection du mur du bâtiment sur le sol, la rugosité du sol et la hauteur de la cible avant l'inondation et la topographie de la zone. Dans le cas de la méthode SIObA, deux gauges ou points de référence dont la hauteur est connue sont également utilisés.

Si certains de ces paramètres peuvent être dérivés des images RSO elles-mêmes, d'autres, comme les paramètres géométriques des bâtiments et les types de matériaux de construction des bâtiments permettant d'estimer la constante diélectrique des murs, nécessitent des relevés sur le terrain. Cela peut constituer une limite importante à l'utilisation de la méthode en mode opérationnel. Les auteurs disent réfléchir actuellement à l'automatisation de ces méthodes. Les premiers essais, réalisés à l'aide d'images TerraSAR-X de l'inondation de la rivière Severn, produisent cependant des résultats relativement satisfaisants. La comparaison des résultats obtenus avec des relevés de hauteurs d'eau réalisés sur le terrain lors de l'inondation a en effet révélé une erreur absolue d'estimation des hauteurs d'eau autour des deux bâtiments comprise entre 0,36 m et 0,45 m avec l'approche SIObA et entre 0,24 m et 0,81 m avec l'approche TIARa. Les images utilisées ayant été acquises en mode StripMap, et ainsi avec une résolution spatiale de 3 m, les auteurs s'attendent à ce que des erreurs plus faibles soient obtenues avec des images Spotlight, la résolution spatiale de 1 m des images devant alors permettre une meilleure détection de la ligne de double réflexion.

2.4 Sommaire

Grâce à sa capacité d'acquérir des images synoptiques mais néanmoins très détaillées des zones touchées par l'inondation, quelles que soient les conditions météorologiques, et aux efforts importants consentis sur l'aspect critique de la résolution temporelle des acquisitions, la télédétection RSO est aujourd'hui considérée comme un des outils les plus adaptés pour la délimitation et la cartographie des zones inondées dans un contexte d'intervention.

Si la détection des plans d'eau libre calme à l'aide de l'imagerie RSO est relativement aisée, il n'en va pas de même avec tous les types de surfaces. En effet, dans les zones urbaines, qui constituent des zones où le risque est potentiellement élevé du fait de la présence importante de

populations et d'infrastructures, l'interprétation du signal rétrodiffusé est rendu particulièrement complexe par des phénomènes tels que les ombres et le déversement ainsi que les réflexions par double rebond, mais aussi par la présence de surfaces permanentes ayant une rétrodiffusion de type spéculaire.

Jusqu'à récemment, le manque d'images RSO de très haute résolution spatiale d'inondations urbaines a restreint les efforts de recherches au développement d'algorithmes de détection des zones inondées à des milieux ruraux. L'acquisition récente de quelques images d'inondations urbaines par des capteurs RSO de très haute résolution spatiale ($\leq 3\text{m}$) a cependant permis le développement de plusieurs approches innovantes pour la détection des zones inondées dans des environnements urbains. Des efforts importants ont été portés sur les aspects cruciaux de l'automatisation de ces approches et des temps de traitement nécessaires à la production des cartes des zones inondées, pour permettre leur utilisation opérationnelle en phase d'intervention.

L'analyse de l'état de l'art de ces approches a permis de souligner l'utilisation fréquente de différentes méthodes de détection des changements d'amplitude et/ou de phase pour la détection des zones inondées, ou encore pour la cartographie des zones affectées par les effets d'ombre et des surfaces permanentes ayant une rétrodiffusion de type spéculaire. Ces approches, qui produisent des résultats satisfaisants, reposent cependant sur la disponibilité d'images RSO de référence acquises avec des paramètres identiques ou de paires d'images interférométriques. Ces images n'étant pas disponibles de manière systématique, l'utilisation opérationnelle de ces approches peut ainsi être limitée. Le recours à des approches mono-temporelles devrait être privilégié.

De plus, les avantages de l'information de contexte, exploitée dans les processus de segmentation et de classification des images RSO, ont été largement soulignés. L'utilisation de cette information, à l'aide de diverses méthodes, semble en effet particulièrement pertinente quand des images radar de très haute résolution spatiale d'inondation sont utilisées, et permettent d'améliorer grandement la précision des classifications et leur cohérence spatiale.

Enfin, l'utilisation importante, sinon systématique, de données auxiliaires dans les approches de détection des zones inondées a été mise en relief. Si quelques études ont mis à profit des données auxiliaires dans le but de limiter l'impact des effets d'ombre et de déversement sur la pertinence de la classification, ces données sont le plus souvent utilisées pour guider ou affiner la classification des zones inondées. L'intégration de considérations hydrauliques à la

classification des zones inondées est réalisée exclusivement à partir de données, à savoir des modèles numériques de terrain, dont seules de simples analyses d'élévation, de proximité ou encore de connectivité, peuvent être extraites. Si aucune étude n'a à ce jour mis à profit des données à caractère hydraulique explicite pour la classification et la cartographie des zones inondées basées sur l'imagerie RSO, leur intégration devrait cependant permettre de tenir compte d'un plus grand nombre de facteurs influençant l'écoulement des eaux, et ainsi de la dynamique spatiale des phénomènes d'inondation pour un cours d'eau donné. Cependant, et c'est un point important, l'intégration de telles données à une approche de cartographie des zones urbaines et rurales inondées ne peut se faire sans que leur disponibilité soit assurée.

Finalement, cet état de l'art s'est intéressé aux méthodes d'extraction des hauteurs d'eau dans les zones inondées utilisant comme base la cartographie des zones inondées extraites d'images RSO. Un des points communs de la plupart des méthodes présentées est l'utilisation de sections transversales positionnées le long de la rivière, pour l'extraction des niveaux d'eau aux extrémités des zones inondées. Diverses méthodes sont utilisées pour tenir compte de l'incertitude des élévations issues des données LIDAR, de la diminution des hauteurs d'eau d'amont en aval de la rivière, ou encore de la présence de végétation et d'ombres aux extrémités des sections transversales. Dans certains cas, ces données corrigées servent uniquement à dériver un profil longitudinal de niveau d'eau, plus adapté à la réduction de l'incertitude de modèles hydrauliques qu'à une approche d'évaluation du risque.

Quelques approches, parmi les plus prometteuses, permettent cependant d'estimer les hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée. Elles utilisent pour cela des méthodes d'interpolation des niveaux d'eau extraits des sections transversales, basées notamment sur les réseaux triangulés irréguliers (ou TIN) ou sur différents modèles d'analyses de régression. Les meilleurs résultats obtenus grâce à ces méthodes ont été présentés par Schumann *et al.* (2007). L'approche proposée combine la méthode des TIN et un modèle de régression multiple, appelé REFIX, et a été testée sur une section de la rivière Moselle, au Luxembourg. Les résultats obtenus présentent un RMSE de 16 cm lorsqu'ils sont comparés à des relevés réalisés sur le terrain au cours de l'inondation, ce qui est considéré comme très précis. Cette approche n'a cependant pas été testée à l'aide d'images RSO de zones urbaines inondées.

A ce jour, seul Iervolino *et al.* (2015) ont proposé deux méthodes, à savoir la méthode SIObA, qui permet d'estimer les hauteurs d'eau autour d'un bâtiment, et la méthode TIAra, qui permet d'estimer les hauteurs d'eau dans l'ensemble d'une zone urbaine inondée. Ces deux méthodes sont basées sur l'utilisation de modèles théoriques de rétrodiffusion, adaptés au cas de

contribution par double réflexion du signal radar en situation d'inondation. Les résultats obtenus suite à l'application de ces méthodes sur des images TerraSAR-X d'une résolution spatiale de 3 m ont montré des erreurs absolues d'estimation des hauteurs d'eau au niveau de deux bâtiments comprises entre 0,36 m et 0,45 m avec l'approche SIObA et entre 0,24 m et 0,81 m avec l'approche TIArA, ce qui peut être considéré comme assez peu précis. Une des limites majeures de ces approches, outre le fait qu'elles ne soient pas automatisées, est le grand nombre d'informations qu'elles nécessitent et qui ne peuvent pas être extraites de l'image RSO d'inondation. L'utilisation opérationnelle de ces méthodes pourrait donc s'avérer difficile.

3. CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION

Ce troisième chapitre présente les méthodes de caractérisation spatiale de l'aléa inondation développées pour répondre aux objectifs du premier volet de ces travaux de thèse. Il se concentre tout d'abord sur la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées (3.1), puis présente la méthode d'extraction des hauteurs d'eau en zones inondées qui en découle (3.2). Il introduit par la suite le site sur lequel ces méthodes ont été testées, à savoir la rivière Richelieu, située au sud de la province du Québec, et qui a connu une inondation d'envergure au printemps 2011 (3.3). L'ensemble des données disponibles pour l'application de ces méthodes à ce site test est ensuite présenté, ainsi que les prétraitements qui leur ont été appliqués (3.4). Enfin, les principaux points de ce chapitre seront rappelés dans un court sommaire (3.5).

3.1 Méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées

La méthode de détection des zones urbaines et rurales inondées développée dans le cadre de ces travaux tire profit de deux types de données, à savoir l'imagerie RSO en bande C et en polarisation HH, et les données d'intervalles de récurrence d'inondation, estimées en tout point de la plaine inondable étudiée.

L'imagerie RSO est utilisée pour sa capacité à détecter les zones inondées en eau libre, capacité qui a déjà été démontrée au cours du Chapitre 2. On considère ici comme des zones d'eau libre les zones où seule de l'eau est présente sur le sol, sans émergence de végétation ou d'éléments anthropiques. L'utilisation d'images radar en polarisation horizontale (HH) est préférée à celle de données acquises en polarisation verticale (VV ou HV), car elle permet généralement d'obtenir un meilleur contraste entre l'eau libre et le reste de l'occupation du sol (Brisco *et al.*, 2008). L'image doit avoir été préalablement filtrée afin de minimiser le chatoiement, être convertie en dB et être géoréférencée.

Les données d'intervalles de récurrence d'inondation font référence à la période de retour d'une inondation dans une zone. Cette période de retour est égale à l'inverse de la probabilité que l'évènement d'inondation soit dépassé ou égalé chaque année. L'estimation de ces données se

fait à l'aide d'analyses hydrologiques puis hydrauliques adaptées à la rivière ou à la section de rivière étudiée. L'analyse hydrologique permet d'établir des débits de crue de récurrence, à partir d'une analyse statistique d'un grand nombre de débits maximaux annuels enregistrés à une station hydrométrique située sur la rivière. L'analyse hydraulique permet ensuite d'établir les cotes de crue (c'est-à-dire l'élévation du niveau d'eau pour un débit de crue donné) associées à chaque débit de crue de récurrence. Cette analyse hydraulique peut être réalisée par modélisation hydraulique du secteur de rivière étudié à l'aide de différents logiciels spécialisés ou encore à l'aide de relations dites « niveau-débit » et « niveau-niveau », estimées à différentes sections de la rivière étudiée. De par la manière dont elles sont générées, les données de récurrence d'inondation permettent ainsi de tenir compte non seulement des caractéristiques hydrauliques et géomorphologiques d'une rivière, mais aussi des caractéristiques hydrologiques d'évènements d'inondation passés.

Dans cette étude, les données d'intervalles de récurrence d'inondation sont exploitées dans le but de déterminer l'étendue des surfaces inondées dans les zones où l'imagerie radar présente des limites, comme dans les zones urbaines ou sous un couvert végétal dense. Nous nous basons sur l'intervalle de récurrence d'inondation maximum extrait des zones inondées avec certitude, en l'occurrence des zones inondées en eau libre. De manière générale, les intervalles de récurrence d'inondation et les cotes de crues associées sont estimés pour un nombre limité de périodes de retour. Ainsi, les intervalles de récurrence d'inondation restent inconnus pour l'ensemble des points de la plaine inondable situés entre les limites des plaines inondables de récurrences connues et à l'extérieur des limites de la plaine inondable de plus fort intervalle de récurrence d'inondation ayant été estimé. Une méthode a donc été développée pour estimer les intervalles de récurrence en tout point de la plaine inondable, et sera présentée dans la section 3.1.1. Cette méthode doit être appliquée au cours d'une étape de prétraitements, c'est-à-dire avant que la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales ne soit utilisée.

Un organigramme méthodologique de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées est présenté à la Figure 3.1.

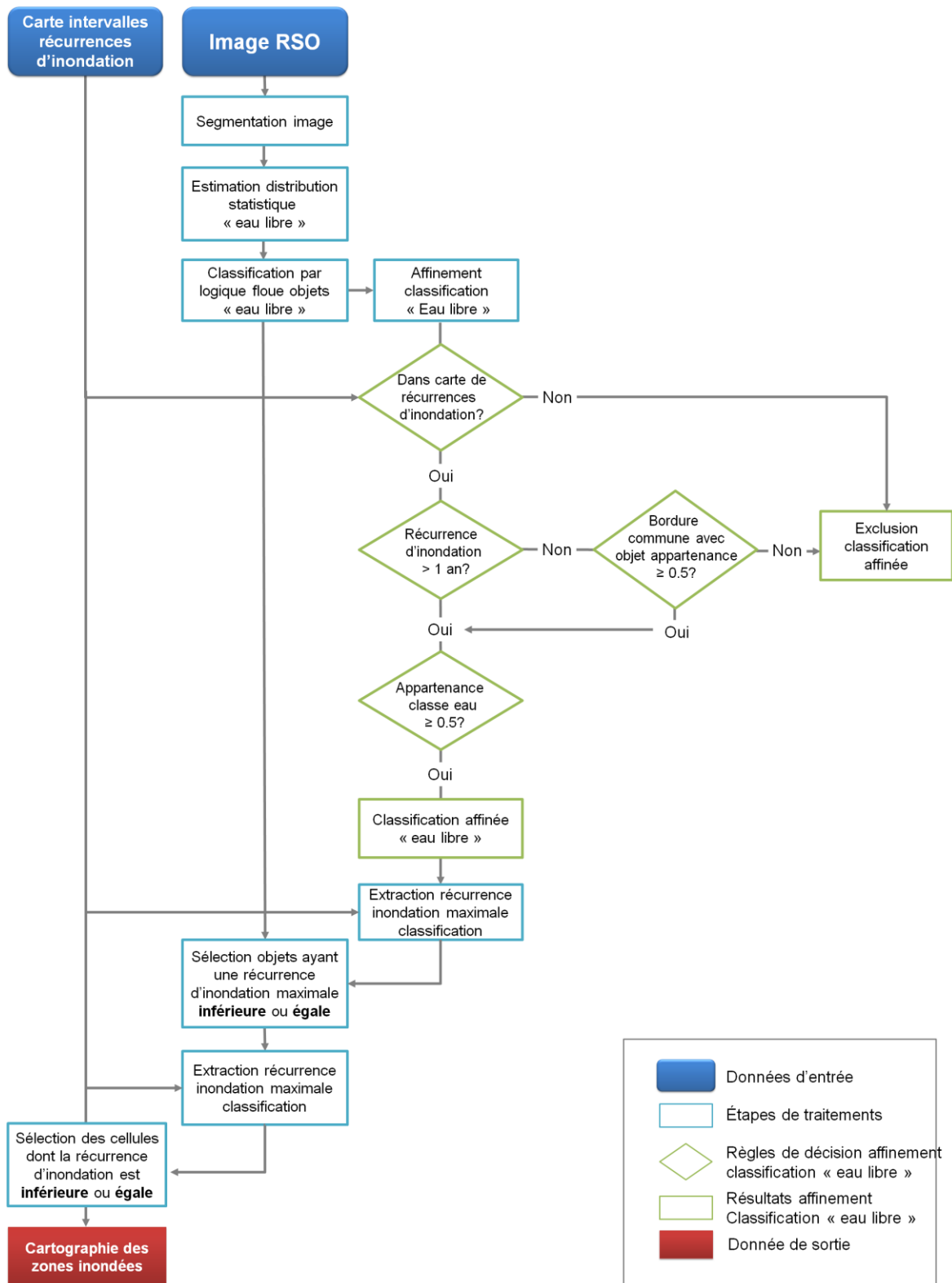


Figure 3.1: Organigramme méthodologique de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées

La première étape de cette méthode consiste en la détection des zones inondées en eau libre sur l'image RSO, à l'aide d'une approche de classification orientée-objets. La récurrence d'inondation maximale correspondant à l'inondation de ces zones en eau libre est ensuite extraite de la carte des intervalles de récurrence d'inondation. Elle est alors appliquée à l'ensemble de la plaine inondable : tous les points de la plaine inondable ayant une valeur de récurrence d'inondation inférieure ou égale à la récurrence d'inondation maximale extraite des zones inondées en eau libre sont sélectionnés. Cette sélection représente l'étendue des zones urbaines et rurales inondées au moment de l'acquisition de l'image RSO. Ces différentes étapes seront présentées et détaillées dans les sous-sections suivantes (sections 3.1.2 et 3.1.3).

3.1.1 Méthode d'estimation de l'intervalle de récurrence d'inondation en tout point de la plaine inondable

Un organigramme présentant les différentes étapes de la méthode permettant l'estimation des intervalles de récurrence d'inondation en tout point de la plaine inondable est présenté à la Figure 3.2. On doit souligner que les valeurs obtenues à l'aide de cette méthode ne représentent pas un intervalle de récurrence d'inondation réel, ni une réalité hydrologique. Il s'agit uniquement d'une estimation, déduite de l'élévation et de la localisation du point pour lequel cette valeur est estimée et des caractéristiques (localisations, élévations et intervalles de récurrences) des limites des plaines inondables de différentes récurrences disponibles pour la rivière étudiée. Les intervalles de récurrence d'inondation estimés à l'aide de cette méthode doivent ainsi être considérés comme des valeurs relatives.

La méthode proposée nécessite d'avoir à disposition les données suivantes :

1. Les limites des plaines inondables disponibles pour la rivière étudiée. Au moins trois limites de plaines inondables de récurrences différentes doivent être disponibles pour permettre d'obtenir une estimation de l'intervalle de récurrence d'inondation en chaque point de la plaine inondable. Ces limites doivent être converties en un semis dense de points (une densité d'au moins un point par 5 m est conseillée).
2. Pour chaque intervalle de récurrence d'inondation disponible, l'élévation de la surface d'eau au centre de la rivière, sous forme de points côtés. Si ces élévations ne sont disponibles qu'en un semis de points peu dense et irrégulier, une densification des points sera nécessaire. L'élévation de la surface d'eau au niveau des nouveaux points créés

est définie à l'aide d'une méthode d'interpolation linéaire basée sur l'inverse de la distance par rapport au point coté le plus proche pour lequel l'élévation de la surface d'eau est connue (Watson *et al.*, 1985).

3. Un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Pour permettre l'extraction de valeurs d'élévation précises aux limites des plaines inondables, puis des estimations adéquates des intervalles de récurrence d'inondation, de hautes précisions altimétriques et planimétriques du MNT sont requises (une précision de ± 15 cm serait par exemple adaptée). Une très haute résolution spatiale (de 1 m par exemple) devrait également être privilégiée.

L'estimation des intervalles de récurrence d'inondation en chaque point de la zone inondable est réalisée en trois étapes. Les outils disponibles dans le logiciel commercial ArcGis version 10.3 ont été utilisés pour les différentes manipulations constituant l'étape 1. Les étapes 2 et 3 ont été réalisées à l'aide de scripts en langage Python (version 2.7.8) développés par Jimmy Poulin, professionnel de recherche à l'INRS-ETE.

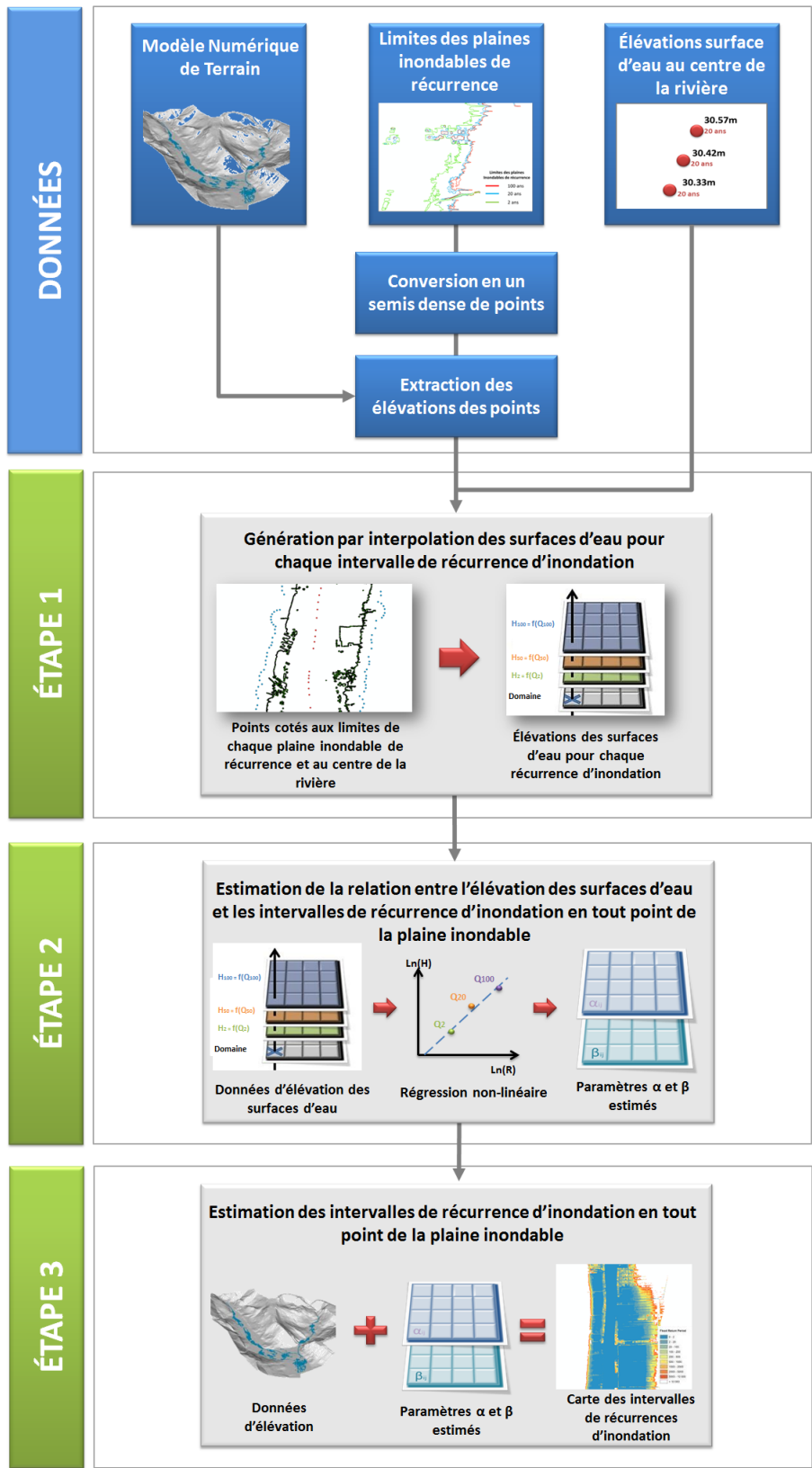


Figure 3.2: Organigramme méthodologique pour l'estimation des intervalles de récurrences d'inondation en tout point de la plaine inondable

Étape 1 : Création des surfaces d'eau

Tout d'abord, les surfaces d'eau associées à chaque cote de crue disponible doivent être créées. Pour se faire, les élévations des points matérialisant les limites de chaque plaine inondable de récurrence sont extraites du MNT. Pour permettre l'extrapolation des intervalles de récurrence d'inondations dans les zones situées à l'extérieur des limites de la plaine inondable de plus faible récurrence disponible, une zone tampon de 150 m est créée autour de ces limites. Seules les bordures extérieures de cette zone tampon sont conservées et sont converties en un semis de points dense et régulier. Les élévations de ces points sont ensuite estimées à l'aide d'une méthode de régression par K-Plus Proches Voisins, une technique d'interpolation non paramétrique simple (Altman, 1992). Les 100 points les plus proches du point de calcul sont pris en compte et la moyenne des valeurs plus grandes que la valeur médiane d'élévation est utilisée comme valeur d'élévation du point. Cette opération est réalisée pour chaque plaine d'inondation de récurrence disponible.

Une fois l'ensemble de ces données obtenues, les surfaces d'eau peuvent être créées. La surface d'eau associée à chaque récurrence disponible est interpolée spatialement à partir des élévations de la surface d'eau au centre de la rivière, aux limites des plaines d'inondation et aux limites de la zone d'extrapolation, à l'aide d'une technique d'interpolation par voisins naturels. Cette technique, développée par Sibson (1981), est basée sur la recherche du sous-ensemble d'échantillons d'entrée (dans le cas présent, les élévations de points) le plus proche d'un point désigné, auquel elle applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelle afin d'interpoler la valeur du point. Cette méthode locale garantit que les valeurs interpolées soient situées dans la plage de valeurs des échantillons utilisés en entrée. Elle est de plus adaptée à la génération de surfaces d'eau car les données produites sont théoriquement lisses et ne sont pas affectées par des sommets ou des dépressions autres que celles représentées par les données d'entrée (ArcGis Pro, 2015). Les surfaces d'eau créées sont des matrices (en format raster). La valeur de chaque cellule d'une matrice représente l'élévation de la surface d'eau dans la zone recouverte par la cellule, pour un intervalle de récurrence donné. La résolution spatiale des cellules de ces surfaces raster doit être identique à celle du MNT utilisé.

Étape 2 : Estimation de la relation entre l'élévation des surfaces d'eau et les intervalles de récurrence d'inondation en chaque point de la plaine inondable

La relation entre l'élévation des différentes surfaces d'eau créées et les intervalles de récurrence d'inondation associés est estimée pour chaque point de la plaine inondable. Cette relation est exprimée à l'aide de la fonction de régression non linéaire suivante (équation 5):

$$H = \alpha I^\beta \quad (5)$$

Où : H sont les élévations des surfaces d'eau à la position de la cellule, extraite de chaque cellule commune aux différentes matrices de surface d'eau

I est l'intervalle de récurrence d'inondation associé à chaque matrice de surface d'eau

α et β sont les paramètres de la régression non linéaire devant être estimés pour chaque cellule commune aux différentes matrices de surfaces d'eau

Une fois estimés, les valeurs des paramètres α et β sont enregistrées dans deux matrices (format raster) spécifiques. Chaque cellule de la matrice représente la valeur du paramètre α ou β à la position de la cellule.

Étape 3 : Estimation des intervalles de récurrence d'inondation en chaque point de la zone d'étude

L'étape finale de cette méthode consiste en l'estimation des intervalles de récurrence d'inondation en chaque point de la zone d'étude. L'intervalle de récurrence d'inondation est estimé à l'aide des paramètres α et β spécifiques à chaque cellule du domaine et de l'élévation du sol au niveau de la cellule, extraite du MNT de haute résolution de la zone d'étude. Les intervalles de récurrence d'inondation sont estimés à l'aide de l'équation suivante (équation 6) :

$$I = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

Où : I est l'intervalle de récurrence d'inondation devant être estimé

E est l'élévation du sol sous la cellule, extraite du MNT

α et β sont les paramètres de la régression linéaire précédemment estimés pour chaque cellule du domaine

Les résultats sont stockés dans une matrice en format raster. La valeur de chaque cellule de ce raster représente l'intervalle de récurrence, exprimé en années, pour lequel la zone représentée par la cellule peut être inondée.

3.1.2 Classification orientée-objets des zones inondées en eau libre

La classification des zones inondées en eau libre sur l'image RSO d'inondation est réalisée par l'intermédiaire d'une approche de classification orientée-objets. La première étape de cette classification consiste ainsi en la segmentation de l'image RSO en objets homogènes. Pour cela, le module de segmentation multi-résolution disponible dans le logiciel commercial eCognition Developer 8 est utilisé. Cet algorithme a déjà été mis à profit dans plusieurs études exploitant l'imagerie RSO de haute résolution spatiale pour la délimitation de différents types d'occupation du sol et a montré sa capacité à délimiter les plans d'eau libre avec précision (voir par exemple Dabiri *et al.*, 2015; Evans *et al.*, 2014; Flores De Santiago *et al.*, 2013; et Mason *et al.*, 2012a). La classification des objets issus de la segmentation multi-résolution de l'image RSO est basée sur la logique floue (Zadeh, 1965). Les paramètres ou seuils représentant les limites de l'ensemble flou Eau libre sont extraits de la distribution théorique des valeurs moyennes de rétrodiffusion des objets représentant les surfaces d'eau libre, qui a été préalablement calibrée. Enfin, la classification de l'eau libre est raffinée, dans le but de limiter la présence d'erreurs de commission. Pour se faire, le degré d'appartenance des objets à la classe Eau libre ainsi que leurs intervalles de récurrence d'inondation (extraits de la carte générée préalablement) sont utilisés.

a) Segmentation multi-résolution de l'image RSO

L'algorithme de segmentation multi-résolution utilisé dans l'approche qui est ici proposée repose sur une méthode de segmentation ascendante, utilisant une technique de regroupement de régions par paires (Definiens AG, 2011). La segmentation débute avec des « objets » constitués d'un pixel unique, qui sera regroupé de manière itérative à des pixels ou « objets » voisins dont les caractéristiques sont similaires ou proches. Le processus d'optimisation locale sous-jacent à ce regroupement minimise l'hétérogénéité de l'objet créé suite à la fusion de deux objets. Ainsi, le processus de regroupement d'objets adjacents se poursuit jusqu'à ce que le critère de

croissance maximal d'hétérogénéité de l'objet fixé par l'utilisateur par l'intermédiaire d'un paramètre d'échelle soit atteint (Benz *et al.*, 2004).

Le critère de croissance de l'hétérogénéité utilisé par cet algorithme de segmentation multi-résolution considère deux caractéristiques principales des objets, à savoir leur couleur et leur forme, dont les fonctions respectives s'expriment comme suit (Benz *et al.*, 2004; Definiens AG, 2011; Hoang, 2013) (équations 7, 8 et 9) :

$$f = P_{couleur} \cdot h_{couleur} + (1 - P_{couleur}) \cdot h_{forme} \quad (7)$$

$$h_{couleur} = \sum_c P_c \left(n_{fusion} \cdot \sigma_c^{fusion} - (n_{obj1} \cdot \sigma_c^{obj1} + n_{obj2} \cdot \sigma_c^{obj2}) \right) \quad (8)$$

$$h_{forme} = P_{compacité} \cdot h_{compacité} + (1 - P_{compacité}) \cdot h_{lissage} \quad (9)$$

Où : f est la croissance de l'hétérogénéité

$P_{couleur}$ est le poids donné à l'information spectrale (couleur)

$h_{couleur}$ est l'hétérogénéité spectrale d'un objet

σ_c sont les valeurs spectrales

P_c est le poids attribué à chaque bande de l'image

$h_{compacité}$ est le critère de compacité

$h_{lissage}$ est le degré de lissage

h_{forme} est l'hétérogénéité de forme

$P_{compacité}$ est le poids donné au critère de compacité

n est le nombre de pixels contenus dans l'objet

$obj1$ et $obj2$ représentent les objets dont la fusion est considérée

$fusion$ représente l'objet fusionné

Les poids attribués à l'information spectrale ($h_{couleur}$) et au critère de compacité ($h_{compacité}$) sont déterminés par l'utilisateur dans l'intervalle [0,1], de même que le poids attribué à chaque bande de l'image (P_c), dont la valeur n'est cependant pas limitée à un intervalle donné. Le diagramme conceptuel présenté dans la Figure 3.3 permet de mieux comprendre l'organisation et les liens entre les différentes composantes de l'algorithme de segmentation multi-résolution.

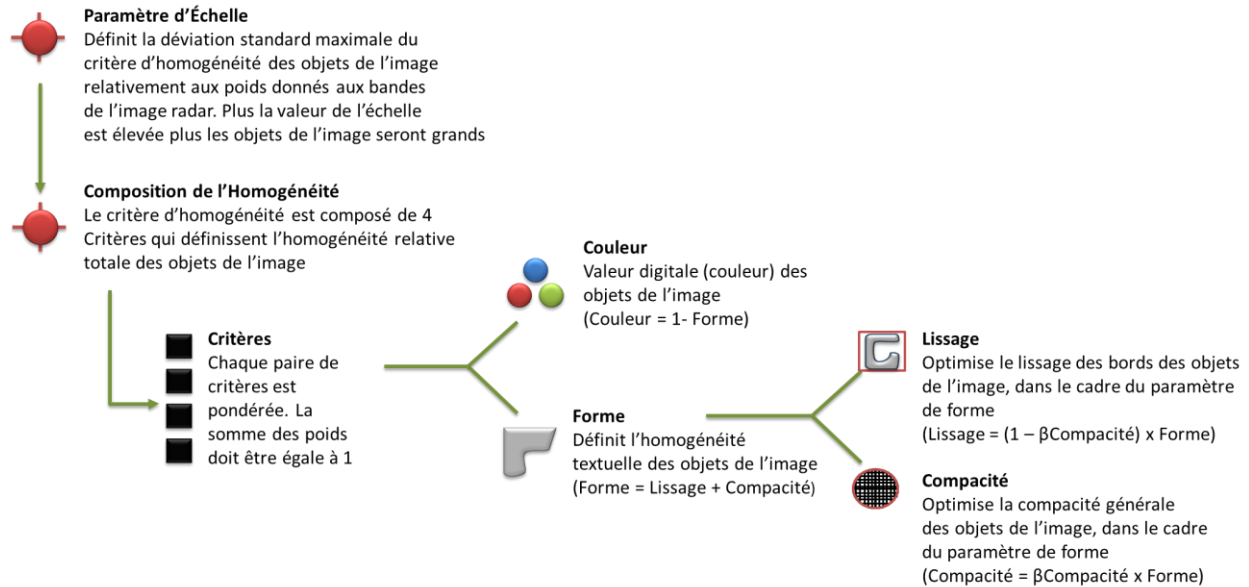


Figure 3.3: Diagramme conceptuel de l'algorithme de segmentation multi-résolution du logiciel eCognition Developer 8 (traduit de Definiens AG (2011))

L'application de l'algorithme de segmentation multi-résolution sur l'image RSO nécessite que le poids de quatre paramètres soit défini au préalable, tel qu'illustré sur la Figure 3.4:

- Le **poids des bandes** de l'image : le poids donné aux bandes de l'image détermine l'importance donnée à l'information contenue dans les pixels d'une bande dans le processus de segmentation. Plus le poids donné à une bande est important, plus l'information (ici l'intensité de la rétrodiffusion) de chacun des pixels va influencer le processus de segmentation.
- Le paramètre d'**échelle** : la valeur qui lui est attribuée est une valeur abstraite, qui définit la déviation standard maximale du critère d'homogénéité permise pour les objets segmentés, relativement aux poids donnés aux bandes de l'image RSO. Il influence ainsi la taille des objets segmentés. Pour une même échelle, les objets créés seront de plus petite taille sur des zones de l'image radar présentant des coefficients de rétrodiffusion hétérogènes, comme un milieu urbain dense, que sur des surfaces homogènes, telles qu'une rivière.

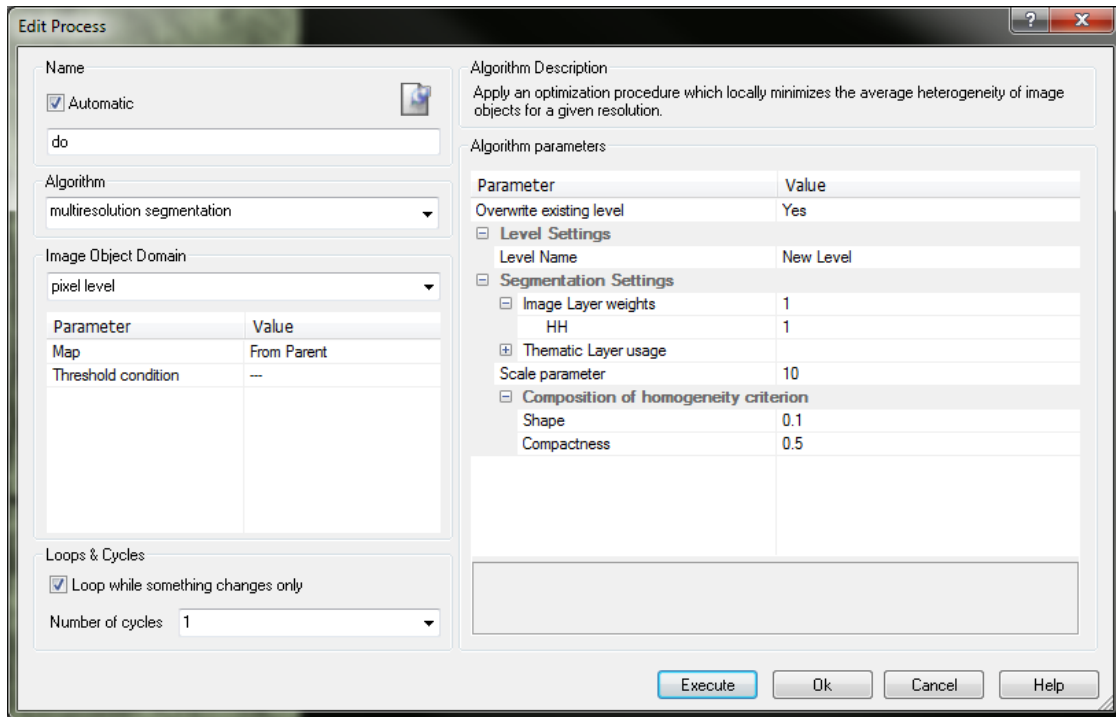


Figure 3.4: Boite de dialogue de l'algorithme de segmentation Multi-résolution d'eCognition Developer 8

Le critère d'homogénéité, auquel le paramètre d'échelle se réfère, définit l'homogénéité des objets segmentés. Le terme homogénéité est ici utilisé comme synonyme de minimisation de l'hétérogénéité, notion à laquelle il a été fait référence précédemment. Le critère d'homogénéité est défini par deux critères : la **forme** (lui-même défini par les critères de compacité et de lissage) et la **couleur**.

- Le critère de **forme** : le poids de ce critère, situé dans l'intervalle [0,1], va permettre de déterminer l'importance du paramètre de forme d'un objet par rapport à sa valeur spectrale (ou **couleur**). Ainsi, un fort poids attribué au critère de forme aura pour effet de créer des objets spatialement homogènes. Si au contraire un faible poids lui est attribué, le paramètre de couleur (et ainsi l'intensité des pixels de l'image) prévaudra et les objets créés seront avant tout spectralement homogènes. L'information spectrale étant l'information principale contenue dans les images, et en particulier dans les images RSO, il est généralement conseillé de ne pas attribuer un poids trop élevé au critère de forme, afin d'éviter une segmentation fractale mais plutôt d'obtenir des segments corrélés avec les objets au sol (Definiens Reference Book, 2011).

- Le critère de **compacité** : ce critère de compacité est lié au critère de **forme**, et est composé de deux paramètres, à savoir la **compacité** et le **lissage**. Ces deux paramètres, dont les poids doivent se situer dans l'intervalle [0,1], permettent d'optimiser l'homogénéité des objets en tenant compte de leur forme. Le paramètre de compacité permet d'optimiser la forme des objets en tenant compte de la compacité de leurs bordures. Un poids plus important devrait en théorie lui être attribué en présence d'objets plutôt compacts mais séparés d'autres objets non compacts par un faible contraste spectral (Definiens Reference Book, 2011). Cela est par exemple le cas quand l'image comporte des objets de formes variables mais ayant des signatures spectrales similaires. Le critère de lissage permet quant à lui de tenir compte de l'aspect arrondi des bordures des objets (Huong, 2014). On conseille de lui attribuer un poids plus important quand l'image contient des surfaces très hétérogènes.

La segmentation multi-résolution a été utilisée pour délimiter les zones d'eau libre sur les images RSO d'inondation. Les poids attribués aux différents critères de l'algorithme ont donc été définis en fonction des caractéristiques de l'eau libre sur une image RSO. Ces surfaces ayant généralement des valeurs de rétrodiffusion faibles et homogènes, un faible poids devrait être attribué au critère de forme, afin de donner une influence plus importante du critère de couleur (intensité spectrale) dans le critère d'homogénéité. De plus, ces surfaces ne sont pas compactes, et sont plutôt caractérisées par des formes arrondies. Ainsi, un plus fort poids est attribué au critère de lissage.

Après une série de tests, durant laquelle plusieurs combinaisons de poids ont été attribuées aux critères d'homogénéité et leurs résultats sur la segmentation de l'image ont été analysés et comparés, un poids de 0,1 a été attribué à la valeur de forme, donnant ainsi un poids de 0,9 au paramètre de couleur. Un poids de 0,5 a été attribué au critère de compacité, donnant ainsi un poids égal au critère de lissage. Enfin, pour permettre l'estimation de la distribution statistique de « l'eau libre » sur un grand nombre de données représentatives de cette classe, la valeur du paramètre d'échelle doit être basse. Elle a ainsi été fixée à 5. Seule la bande HH étant utilisée pour la segmentation, son poids est de 1. Le Tableau 3.1 présente les poids et valeurs attribués aux différents paramètres de la segmentation multi-résolution des images RSO d'inondation.

Tableau 3.1: Paramètres de la segmentation multi-résolution des images RSO d'inondation

Critère	Poids ou valeur
Poids de la bande HH	1
Échelle	5
Couleur	0,9
Forme	0,1
Lissage	0,5
Compacité	0,5

Selon la taille de l'image utilisée et les capacités de l'ordinateur utilisé, les temps de traitement associés à la segmentation de l'image à l'aide de cet algorithme peuvent être longs. C'est une des limites de cette méthode de segmentation. Cependant, la réduction de la taille de l'image, par la création d'un sous-ensemble de l'image originale centré sur les zones inondées, permet d'améliorer grandement les temps de traitement de la segmentation orientée-objets.

b) Estimation de la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d'Eau libre

La seconde étape de l'approche de détection des zones d'eau libre consiste en l'estimation de la fonction de densité de probabilité (FDP) des valeurs moyennes de rétrodiffusion extraites des objets correspondant en théorie à de l'eau libre sur l'image RSO d'inondation.

Cette méthode a été appliquée avec succès dans les travaux présentés par Matgen *et al.* (2011) et par Giustarini *et al.* (2013) pour la détection des zones d'eau libre sur des images d'inondations acquises par les capteurs ENVISAT ASAR et TerraSAR-X, respectivement. Dans ces deux approches, une FDP de type Gamma a été ajustée à la distribution statistique des valeurs de rétrodiffusion des pixels d'eau libre des images RSO. Le but est d'extraire, à l'aide de seuils appropriés, deux paramètres nécessaires à une approche de segmentation par croissance de région, à savoir les noyaux de croissance des zones d'eau libre et le critère de tolérance de dilatation de ces noyaux. La sélection d'une FDP de type Gamma a été faite sur la base de remarques présentées dans les travaux d'Ulaby *et al.* (1986a), qui ont montré que la FDP de surfaces homogènes dont la variabilité des coefficients de rétrodiffusion est

principalement due au bruit de l'image est de type Gamma. Les surfaces d'eau libre étant généralement des surfaces homogènes agissant comme des réflecteurs spéculaires et ayant ainsi de faibles valeurs de rétrodiffusion, on suppose que la distribution statistique des valeurs de rétrodiffusion de ces surfaces suit une distribution Gamma (Matgen *et al.*, 2011).

Des FDP alternatives, telles que les fonctions par K-distribution (Watts *et al.*, 1990) et de distribution RIG (Eltoft, 2005), qui sont deux fonctions adaptées à l'estimation des statistiques de rétrodiffusion des images radar, ont été paramétrées et testées par Giustarini *et al.* (2013). Leur paramétrage apparaît être plus complexe que celui d'une FDP Gamma, pour laquelle l'ajustement de deux paramètres uniquement est nécessaire. Les résultats obtenus ont de plus montré que ces fonctions ne permettent pas d'obtenir une meilleure estimation des distributions empiriques de l'eau libre qu'une fonction de type Gamma. Il en va de même avec une FDP de type normale, qui a été paramétrée et testée sur les données disponibles dans le cadre de ces travaux. Les résultats ont montré que ce type de FDP tend à sous-estimer légèrement l'étendue de la queue de la distribution des rétrodiffusions des zones d'eau libre. Cela pourrait mener à une sous-estimation de la présence d'objets d'eau libre sur les images RSO en présence d'inondations.

Une FDP de type Gamma a ainsi été choisie afin d'estimer la distribution théorique des rétrodiffusions des objets d'eau libre de l'image. Malgré l'attention portée à la sélection des paramètres utilisés pour la segmentation multi-résolution de l'image, on ne peut pas exclure le fait que des pixels puissent avoir été inclus dans des objets représentant une surface à laquelle ils n'appartiennent pas en réalité. Afin de limiter l'influence de ces pixels sur les statistiques de rétrodiffusion des objets, les valeurs moyennes de rétrodiffusion des objets de l'image sont utilisées pour estimer la distribution théorique de leurs rétrodiffusions.

Initialement, la fonction de densité de probabilité de type Gamma utilisée pour estimer la distribution statistique des rétrodiffusions des objets d' « eau libre » peut être exprimée de la manière suivante (équation 10) :

$$f(\sigma^0/k, \theta) = \frac{(\sigma^0 - \sigma_1^0)^{k-1}}{\theta^k \Gamma(k)} \cdot e^{-\frac{(\sigma^0 - \sigma_1^0)}{\theta}} \quad (10)$$

Où : k est le paramètre de forme de la distribution Gamma
 θ est le paramètre d'échelle

σ^0 est la valeur du pixel de l'image, en dB

σ_1^0 représente la valeur de rétrodiffusion moyenne la plus faible de l'ensemble des objets de l'image RSO, en dB

La distribution Gamma étant estimable uniquement pour des valeurs positives, les valeurs moyennes de rétrodiffusion sont converties afin d'être positives pour l'ensemble de la gamme de valeurs empiriques. L'application du paramètre σ_1^0 permet ainsi de calculer la FDP sur des valeurs positives.

Suivant les travaux présentés par Matgen *et al.* (2011), la formule du mode de la distribution Gamma a été utilisée pour faciliter la procédure d'ajustement (équation 11). Ainsi, quand $k \geq 1$:

$$\sigma_m^0 = (k - 1) \cdot \theta + \sigma_1^0 \quad (11)$$

Où : σ_m^0 est la valeur du mode de la distribution des objets d'Eau libre, en dB

La fonction de densité de probabilité peut alors être exprimée de la manière suivante (équation 12):

$$f_{\sigma_m^0}(\sigma^0/k) = \frac{(\sigma^0 - \sigma_1^0)^{k-1}}{\left(\frac{\sigma_m^0 - \sigma_1^0}{k-1}\right)^k \cdot \Gamma(k)} e^{-\frac{(\sigma^0 - \sigma_1^0) \cdot (k-1)}{(\sigma_m^0 - \sigma_1^0)}} \quad (12)$$

Ainsi, pour une valeur donnée de σ_m^0 , seule la valeur k doit être optimisée pour déterminer $f_{\sigma_m^0}$. Afin d'éviter d'avoir à déterminer manuellement une valeur initiale pour le paramètre σ_m^0 , les modes de la fonction de densité de probabilité théorique des valeurs moyennes de rétrodiffusion des objets de l'image RSO inondée sont détectés de manière automatique, à l'aide d'un estimateur de maximum local : la valeur du mode présentant la plus forte densité de probabilité dans les valeurs de rétrodiffusion les plus faibles est utilisée comme valeur initiale pour l'estimation du paramètre σ_m^0 . Puis, pour chaque valeur plausible proche de la valeur initiale de σ_m^0 , le paramètre k est optimisé de manière itérative par l'intermédiaire d'un processus d'ajustement non-linéaire par moindres carrés. L'intervalle de recherche à chaque itération est défini de manière automatique par la méthode de régression non-linéaire par moindres carrés,

basée sur l'algorithme PORT pour moindres carrés non linéaires (Fox *et al.*, 2010). Pour chaque ensemble de valeurs des paramètres σ_m^0 et k , la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes (notée RMSE) entre la fonction de densité théorique f et la fonction de densité empirique est estimée. Les valeurs des paramètres σ_m^0 et k permettant l'obtention du RMSE le plus faible sont définies comme les valeurs optimales pour l'estimation de la FDP Gamma des valeurs moyennes de rétrodiffusion des objets segmentés sur l'image RSO d'inondation.

L'approche d'estimation de la FDP théorique des valeurs de rétrodiffusion des objets d'eau libre qui est ici présentée est entièrement automatisée. C'est un avantage important par rapport aux méthodes présentées par Matgen *et al.* (2011) et par Giustarini *et al.* (2013), qui nécessitent de fixer manuellement la valeur initiale du paramètre σ_m^0 ainsi que l'intervalle auquel le processus d'optimisation est réalisé.

Si l'histogramme des valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets segmentés sur l'image RSO d'inondation n'est pas strictement bimodal, ce qui peut arriver si les surfaces d'eau sont rendues rugueuses par l'action du vent ou de fortes pluies, l'algorithme est automatiquement dirigé vers une option alternative. L'algorithme réalise alors une estimation de la première dérivée d'une fonction spline cubique de lissage ajustée à la FDP expérimentale de la valeur moyenne des rétrodiffusions des objets de l'image. Le premier minimum local positif de la dérivée est fixé comme valeur initiale du paramètre σ_m^0 . Les paramètres σ_m^0 et k optimaux sont alors estimés à l'aide de la méthode précédemment décrite.

Une telle solution alternative n'a pas été proposée dans les travaux présentés par Matgen *et al.* (2011). Dans la méthode proposée par Giustarini *et al.* (2013), l'option proposée est manuelle et n'est pas automatisable. Elle consiste en la sélection d'une gamme de valeurs de rétrodiffusion possibles du mode des rétrodiffusions de l'eau libre, à l'intérieur de laquelle l'algorithme teste différents modes pour définir le plus optimal. La dynamique de l'histogramme des rétrodiffusions d'une image RSO variant selon ses paramètres d'acquisition, cette gamme de valeurs doit être fixée de manière individuelle.

La méthode d'estimation de la FDP théorique des valeurs moyennes de rétrodiffusion associées aux objets d'eau libre n'est cependant pas applicable si l'histogramme des valeurs empiriques est strictement uni-modal. Cela peut être le cas si la plupart des surfaces d'eau libre imagées par le capteur RSO sont affectées par du vent ou des pluies fortes. C'est une des limites de notre approche.

c) *Classification par logique floue des objets d'eau libre*

L'étape suivante de la méthode proposée consiste en une première étape de classification des objets d'eau libre de l'image RSO. La revue de littérature présentée au Chapitre 2, et plus précisément les sous-sections 2.3.3 et 2.3.4, a montré que les approches de classification traditionnelles utilisant un seul et unique seuil ne permettent pas de tenir compte des éléments pouvant influencer localement les valeurs de rétrodiffusion des objets d'eau libre, comme la végétation émergente ou le vent. Elles résultent ainsi en des classifications binaires, qui peuvent tendre, selon la position du seuil choisi, à sous-estimer ou à surestimer la présence d'eau libre. Afin de tenir compte de la superposition quasi-systématique d'une partie des valeurs de rétrodiffusion des surfaces d'eau libre et des valeurs de rétrodiffusion d'autres types de couvertures du sol, une approche de classification suivant les règles de la logique floue a été appliquée (Macina *et al.*, 2006). L'intérêt des théories des ensembles flous est qu'elles permettent d'estimer le degré d'appartenance de chaque élément d'un ensemble flou à une classe donnée, selon la valeur de rétrodiffusion de cet élément à l'intérieur des limites de l'ensemble flou.

Le degré d'appartenance de chaque élément à un ensemble flou est signifié par un nombre réel dans l'intervalle $[0,1]$. La valeur 0 signifie « absolument faux » (ou absolument exclu de la classe) alors que la valeur 1 signifie « absolument vrai » (ou absolument inclus dans la classe). Les valeurs situées dans l'intervalle $[0,1]$ décrivent donc des degrés d'appartenance à l'ensemble flou, du moins élevé au plus élevé.

Sur la base des travaux présentés par Pulvirenti *et al.* (2013b) et par Pierdicca *et al.* (2010), une fonction d'appartenance standard de forme Z (Figure 3.5) a été utilisée pour estimer l'appartenance des objets de l'image RSO d'inondation à la classe Eau libre. D'après cette fonction, plus la valeur moyenne de rétrodiffusion des objets de l'image est faible, plus fort sera son degré d'appartenance à la classe Eau libre. Elle est ainsi adaptée à l'évaluation du degré d'appartenance des objets représentant de l'eau libre, généralement caractérisés par de très faibles valeurs de rétrodiffusion.

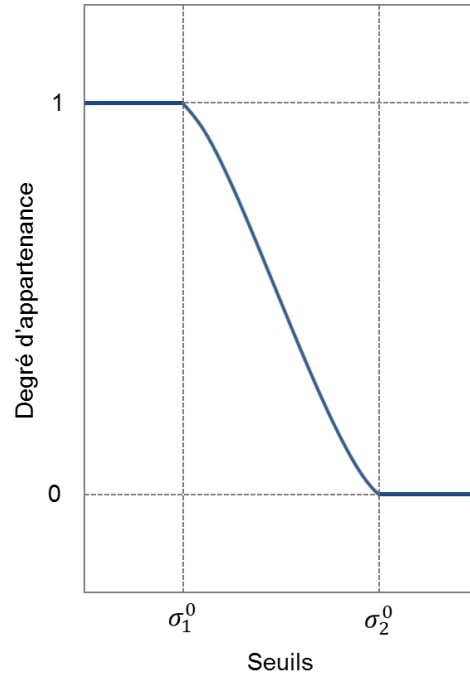


Figure 3.5: Forme de la fonction d'appartenance standard de forme Z

Cette fonction d'appartenance standard de forme Z peut être exprimée de la manière suivante (équation 13) :

$$f(\sigma_x^0, \sigma_1^0, \sigma_2^0) = \begin{cases} 1, \sigma_x^0 \leq \sigma_1^0 \\ 1 - 2 \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_1^0}{\sigma_2^0 - \sigma_1^0} \right)^2, \sigma_1^0 \leq \sigma_x^0 \leq \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2} \\ 2 \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_2^0}{\sigma_2^0 - \sigma_1^0} \right)^2, \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2} \leq \sigma_x^0 \leq \sigma_2^0 \\ 0, \sigma_x^0 \geq \sigma_2^0 \end{cases} \quad (13)$$

Où : σ_x^0 est la valeur de rétrodiffusion moyenne de l'objet pour lequel le degré d'appartenance est estimé, en dB

σ_1^0 et σ_2^0 sont les seuils représentant les limites de l'ensemble flou, en dB

Les paramètres σ_1^0 et σ_2^0 de l'ensemble flou sont extraits de manière automatique des valeurs théoriques de la FDP de type Gamma ajustée aux valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets d'eau libre l'image. Le paramètre σ_1^0 est égal au mode σ_m^0 de la distribution Gamma théorique de

l'eau libre. Le mode σ_m^0 étant situé dans les valeurs de rétrodiffusion très basses des objets de l'image, une superposition des valeurs de rétrodiffusion de l'eau libre et des autres types de couverture du sol au niveau de ce mode est peu probable. Cela permet d'appuyer le choix du mode comme limite de l'ensemble flou. Le paramètre σ_2^0 est égal au 99^{ème} percentile de la distribution Gamma théorique de l'eau libre (Matgen *et al.*, 2011). Cette classification par logique floue des objets de l'image a été réalisée dans le logiciel eCognition. Les valeurs des paramètres σ_1^0 et σ_2^0 sont signifiées comme limites de la fonction d'appartenance de forme Z dans la description de la classe Eau libre dans le logiciel eCognition. Le degré d'appartenance de chaque objet à la classe Eau libre est ensuite estimé de manière automatique par le logiciel, selon la valeur moyenne de rétrodiffusion de l'objet.

La haute valeur percentile de la distribution Gamma théorique choisie pour le paramètre σ_2^0 peut induire des erreurs de commission (ou sur-détections), la queue de la distribution Gamma théorique pouvant s'étendre largement dans les valeurs de rétrodiffusion des autres types de couverture du sol imagés par le capteur. Cependant, l'idée est d'inclure un maximum d'objets liés à de l'eau dans la classification, ce qui inclut les objets d'eau libre dont les valeurs moyennes de rétrodiffusion pourraient être affectées par la présence de végétation émergente ou par des éléments anthropiques de petite taille. Les erreurs de classification résultant de ce premier niveau de classification seront supprimées au cours des étapes suivantes de la méthode.

d) Raffinement de la classification de l'Eau libre

La classification des objets d'eau libre initiée au cours de l'étape précédente doit être affinée dans le but de réduire les erreurs de commission, qui pourraient mener à une surestimation de l'intervalle de récurrence d'inondation utilisé pour créer la cartographie finale de l'étendue de l'inondation. La réduction de ces erreurs exploite deux des caractéristiques des objets intégrés à la classe Eau libre, à savoir leur degré d'appartenance à la classe et leur intervalle maximal de récurrence d'inondation, extrait de la carte d'intervalles de récurrence d'inondation associée à la zone d'étude. Les différentes étapes et règles de décision constituant les étapes de raffinement de la classification sont présentées par des rectangles et des losanges verts dans l'organigramme méthodologique présenté à la Figure 3.1.

Tout d'abord, les objets intégrés à la classe Eau libre (et ayant ainsi un degré d'appartenance strictement supérieur à zéro) mais situés à l'extérieur de la zone couverte par la carte d'intervalles de récurrence d'inondation sont automatiquement retirés de la classification. Compte tenu de leur position très éloignée de la rivière et très largement au-delà de la limite estimée de la crue décennale, il est en effet extrêmement peu probable qu'ils soient atteints par l'inondation, aussi étendue soit-elle et quelles que soient les caractéristiques de la plaine inondable (ex : milieu de faible dénivelé) et les conditions au sol (ex : sol encore gelé). Cette étape ne devrait ainsi pas résulter en la suppression d'objets représentant réellement de l'eau libre.

Puis, les objets ayant un degré d'appartenance à la classe Eau libre supérieur ou égal à 0,5 sont sélectionnés. Les objets ayant un degré d'appartenance à cette classe strictement inférieur à 0,5 mais partageant une bordure commune d'au moins un pixel avec un objet dont le degré d'appartenance à la classe Eau libre est supérieur ou égal à 0,5 sont également inclus dans la sélection. On considère en effet qu'en dépit d'un faible degré d'appartenance à la classe Eau libre, leur connexion spatiale à un objet ayant un degré d'appartenance élevé à cette classe révèle une probabilité élevée d'être réellement inondés.

Puis, l'intervalle de récurrence maximal d'inondation de chaque objet sélectionné est estimé à l'aide de la carte d'intervalles de récurrence d'inondation. Pour limiter l'impact des pixels ne contenant en réalité pas d'eau mais ayant été intégrés à un objet représentant de l'eau libre au cours du processus de segmentation multi-résolution sur l'estimation de cet intervalle de récurrence maximal, le 99^{ème} percentile de l'intervalle de récurrence d'inondation de chaque objet est considéré comme maximum.

Des objets correspondant à des surfaces d'eau permanentes, comme le chenal principal de la rivière, les lacs et les réservoirs, peuvent être particulièrement nombreux et leurs faibles intervalles de récurrence d'inondation sont susceptibles d'influencer les résultats de l'étape finale d'affinement de la classification. Ainsi, les objets dont le 99^{ème} percentile d'intervalle de récurrence d'inondation est inférieur ou égal à 1 an sont retirés de la classification.

Puis, l'ensemble des objets sélectionnés sont fusionnés, pour ne former qu'un seul et unique objet d'eau libre. L'intervalle de récurrence d'inondation maximal (99^{ème} percentile) de cet objet est ensuite extrait de la carte des intervalles de récurrences d'inondation.

Finalement, les objets intégrés à la classe « eau libre » avant les étapes de raffinement de la classification, et dont l'intervalle de récurrence maximal (99^{ème} percentile) d'inondation est inférieur ou égal à l'intervalle de récurrence maximal d'inondation extrait de la classification raffinée de l'eau libre sont sélectionnés. Cela permet d'intégrer à la classification les objets représentant des surfaces effectivement inondées, mais dont les valeurs moyennes de rétrodiffusion sont légèrement influencées par la présence d'éléments de petite dimension comme de la végétation émergente ou des éléments anthropiques par exemple. On obtient ainsi la classification finale des objets d'eau libre.

3.1.3 Cartographie des zones urbaines et rurales inondées

La création de la carte des zones inondées en milieux urbains et ruraux repose sur deux hypothèses. La première est que l'intervalle de récurrence d'inondation est constant le long de la plaine inondable, et ne subit pas de variations locales. Cela devrait être le cas si les données à caractère hydraulique utilisées pour produire la carte des intervalles de récurrence d'inondation sont précises et à jour. La seconde hypothèse est que l'étendue maximale des zones inondées en eau libre détectées dans les zones urbaines et rurales est un indicateur fiable de l'intervalle de récurrence de l'inondation au moment de l'acquisition de l'image RSO.

La méthode est composée de trois étapes simples. Premièrement, l'intervalle maximum de récurrence d'inondation est extrait de la classe Eau libre raffinée, à l'aide de la carte des intervalles de récurrence d'inondation de la zone étudiée. Une fois de plus, le 99^{ème} percentile de l'intervalle de récurrence d'inondation est utilisé pour limiter l'impact des pixels qui n'auraient pas dû être inclus dans les objets d'eau libre au cours du processus de segmentation multi-résolution.

Deuxièmement, toutes les cellules de la carte d'intervalles de récurrence d'inondation présentant un intervalle de récurrence d'inondation inférieur ou égal à cette valeur sont sélectionnées. Ces cellules raster représentent l'étendue de l'inondation dans les zones urbaines et rurales au moment de l'acquisition de l'image RSO.

Troisièmement, ces cellules sont extraites du raster, pour former une nouvelle couche de données raster qui sera utilisée par la suite pour l'extraction des hauteurs de submersion en tout point des zones inondées. Ces données peuvent également être superposées à des images optiques de haute résolution spatiale de la zone étudiée hors situation d'inondation ou encore à une carte de la zone, afin d'obtenir une carte des zones touchées par l'inondation.

3.2 Méthode d'estimation des hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée

La méthode d'estimation des hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée est basée sur une méthode simple, s'inspirant des travaux de Matgen *et al.* (2007b) et de Schumann *et al.* (2007), détaillés au Chapitre 2 (section 2.3.9). Elle consiste tout d'abord à extraire les élévations de la surface de l'eau aux extrémités de sections transversales positionnées sur toute la section de rivière inondée, détectée sur une image RSO. Une surface d'eau est générée à partir des élévations obtenues. Puis, les hauteurs d'eau sont estimées en tout point de la zone inondée en calculant la différence entre les élévations de la surface d'eau et les élévations du sol, obtenues grâce à des relevés LIDAR.

Si la méthode qui est ici proposée s'inspire de ces travaux, elle présente cependant certaines particularités. Tout d'abord, des sections transversales ne sont pas utilisées pour extraire l'élévation des surfaces d'eau. Nous avons préféré extraire les élévations de la surface d'eau à l'aide d'un semis dense de points situés aux limites des zones urbaines et rurales inondées détectées sur l'image RSO. Cela permet de générer une surface d'eau à partir d'un très grand nombre de points de mesure. Aussi, nous avons utilisé une technique d'interpolation par voisins naturels (voir section 3.1.1 pour des détails sur cette technique) pour générer une surface d'eau à partir des élévations aux extrémités des zones inondées. L'organigramme présenté à la Figure 3.6 montre les différentes étapes de l'approche.

Cette approche requiert les données suivantes :

1. Un modèle numérique d'élévation (MNT) de la zone d'étude. Des données d'élévation de haute précision altimétrique et planimétrique devraient être utilisées. Comme on l'a déjà souligné dans la section 3.1.1, une précision altimétrique de ± 15 cm et une résolution spatiale de 1 m seraient par exemple appropriées.
2. Des données raster représentant l'étendue de l'inondation, obtenues suite à l'application de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées (section 3.1).

L'estimation des hauteurs d'eau dans l'ensemble de la zone inondée se fait en quatre étapes. Ces étapes sont réalisées intégralement à l'aide d'outils présents dans le logiciel commercial ArcGis version 10.3. Le développement d'outils spécifiques n'a pas été nécessaire. La méthode a été entièrement automatisée, et ne nécessite pas d'interaction de la part de l'utilisateur.

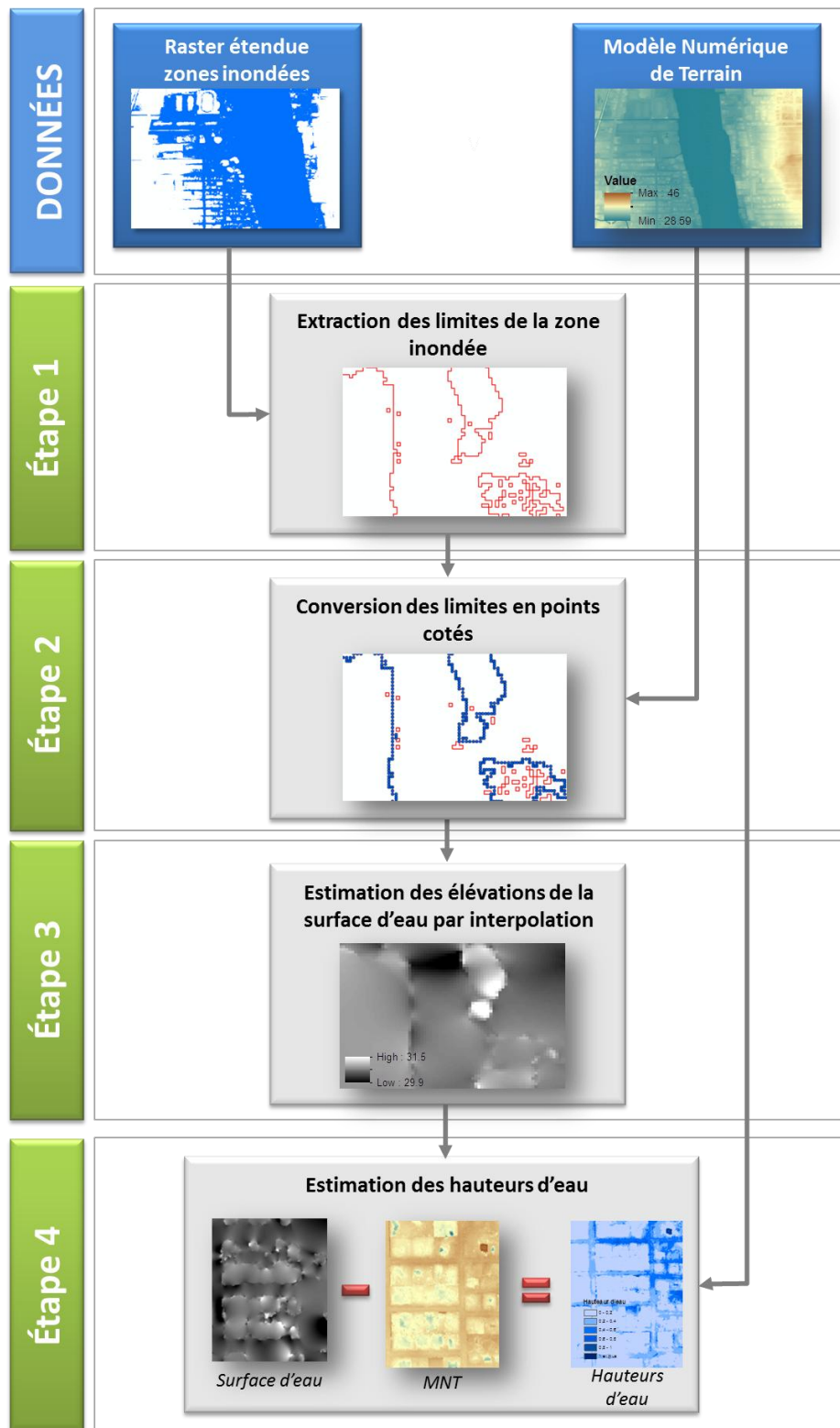


Figure 3.6: Organigramme méthodologique de la méthode d'estimation des hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée

Étape 1 : Extraction des limites de la zone inondée

Les limites des zones inondées sont tout d'abord extraites des données raster d'étendue de l'inondation. On obtient ainsi des polygones matérialisant l'étendue maximale de la plaine d'inondation, et éventuellement les limites des zones présentes dans la plaine d'inondation mais qui n'ont pas été inondées du fait, par exemple, de plus fortes élévations ou encore d'ouvrages tels que des murs. Pour limiter l'effet de cellules isolées ou de petits regroupements de cellules isolées résultant d'erreurs locales du raster d'étendue des zones inondées sur le processus d'interpolation des élévations de la surface d'eau, les polygones ayant une superficie inférieure ou égale à 15 m² sont supprimés. Les limites des zones inondées n'étant pas influencées par d'autres éléments tels que de la végétation, comme c'est très souvent le cas pour les méthodes utilisant uniquement l'imagerie radar pour la délimitation des zones inondées (voir section 2.3.9), il s'agit là de la seule correction devant leur être appliquée.

Étape 2 : Conversion des limites de la zone inondée en points cotés

Ces polygones sont ensuite convertis en un semis dense de points. La densité de ce semis de points est ajustée à la résolution spatiale du MNT utilisé : par exemple, si le MNT a une résolution spatiale de 1 m, les points sont espacés de 1 m. L'élévation du sol au niveau de chaque point est ensuite extraite du MNT et est définie comme l'élévation du point.

Étape 3 : Création de la surface d'eau par interpolation

Une fois ces données obtenues, la surface d'eau est créée à l'aide d'une méthode d'interpolation par voisins naturels (Sibson, 1981), utilisant les valeurs d'élévation des points situés aux limites des zones inondées. Cette méthode d'interpolation a déjà été présentée dans la section 3.1.1. La surface d'eau générée est une matrice (format raster). La valeur de chaque cellule de cette matrice est égale à l'élévation estimée de la surface d'eau au niveau de la zone représentée par la cellule. Cette matrice doit avoir une résolution spatiale identique à celle du MNT utilisé, et doit être parfaitement alignée sur ce dernier.

Étape 4 : Estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées

Une fois cette surface d'eau créée, il est possible d'estimer les hauteurs d'eau en tout point de la zone inondée. Pour cela, les élévations du sol contenues dans le MNT sont soustraites de celles de la surface d'eau. Une surface raster, dont la valeur de chaque cellule représente la

hauteur d'eau lors de l'inondation au niveau de la surface représentée par cette cellule, est obtenue.

3.3 Zone test : la rivière Richelieu

Cette section introduit les caractéristiques hydrographiques, physiographiques et d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Richelieu, dont la section amont a été utilisée pour tester la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées ainsi que l'approche d'extraction des hauteurs de submersion dans les zones inondées. Elle présente également les causes, les caractéristiques et les impacts du phénomène majeur d'inondation qui a touché cette zone au cours du printemps 2011.

3.3.1 Caractéristiques générales du bassin versant de la rivière Richelieu

La zone sur laquelle la méthodologie proposée a été testée est une section de la rivière Richelieu, qui s'écoule au sud-est de la province de Québec, dans la région de la Montérégie (Figure 3.7). La rivière Richelieu fait partie d'un large système hydrographique d'une superficie de 23 720 km², englobant les bassins versants du Lac Champlain (19 925 km²), de la rivière Richelieu (2 506 km²) et de la Baie Missisquoi (1 289 km²). Le sous-bassin versant de la rivière Richelieu représente la portion aval du Lac Champlain, situé aux États-Unis, et en est l'exutoire principal. Ainsi, près de 98% de l'eau s'écoulant dans la rivière Richelieu provient de ce lac. La rivière s'écoule du sud au nord sur 129 km, jusqu'à son exutoire dans le fleuve Saint-Laurent, au niveau des Îles de Sorel, à l'embouchure du lac Saint-Pierre (Carrier *et al.*, 2013).

Le bassin versant de la rivière Richelieu repose sur les Basses-Terres du Saint-Laurent, un des secteurs de la région physiographique de la Plate-Forme du Saint-Laurent, constituée principalement de roches d'origine sédimentaire (grès, dolomites, calcaire, shales) (Dubé-Loubert *et al.*, 2014). Les sols de la vallée de la rivière Richelieu sont généralement caractérisés par une présence importante de sédiments argileux d'origine marine et lacrusto-marine (la mer de Champlain ayant recouvert cette zone il y a 13 000 ans), dont les capacités de drainage sont imparfaites (Carrier *et al.*, 2013). La rivière s'écoule dans une zone au relief très peu accentué et aux faibles pentes, avec des élévations variant de 10 m à 60 m au-dessus du niveau de la mer. De la source de la rivière, au niveau de la frontière canado-américaine, à la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, soit environ 33 km en aval, le dénivelé atteint à peine 30 cm. Il s'accroît par la

suite entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Chambly, avec un dénivelé d'environ 25 m sur 12 km, pour s'adoucir à nouveau jusqu'à l'embouchure. Ainsi, les seuls reliefs importants du bassin versant sont ceux de quatre collines Montérégiennes, constituées de roches ignées alcalines (roches d'origine magmatique) intrusives, dont les altitudes varient entre 200 m et 400 m (Carrier *et al.*, 2013).

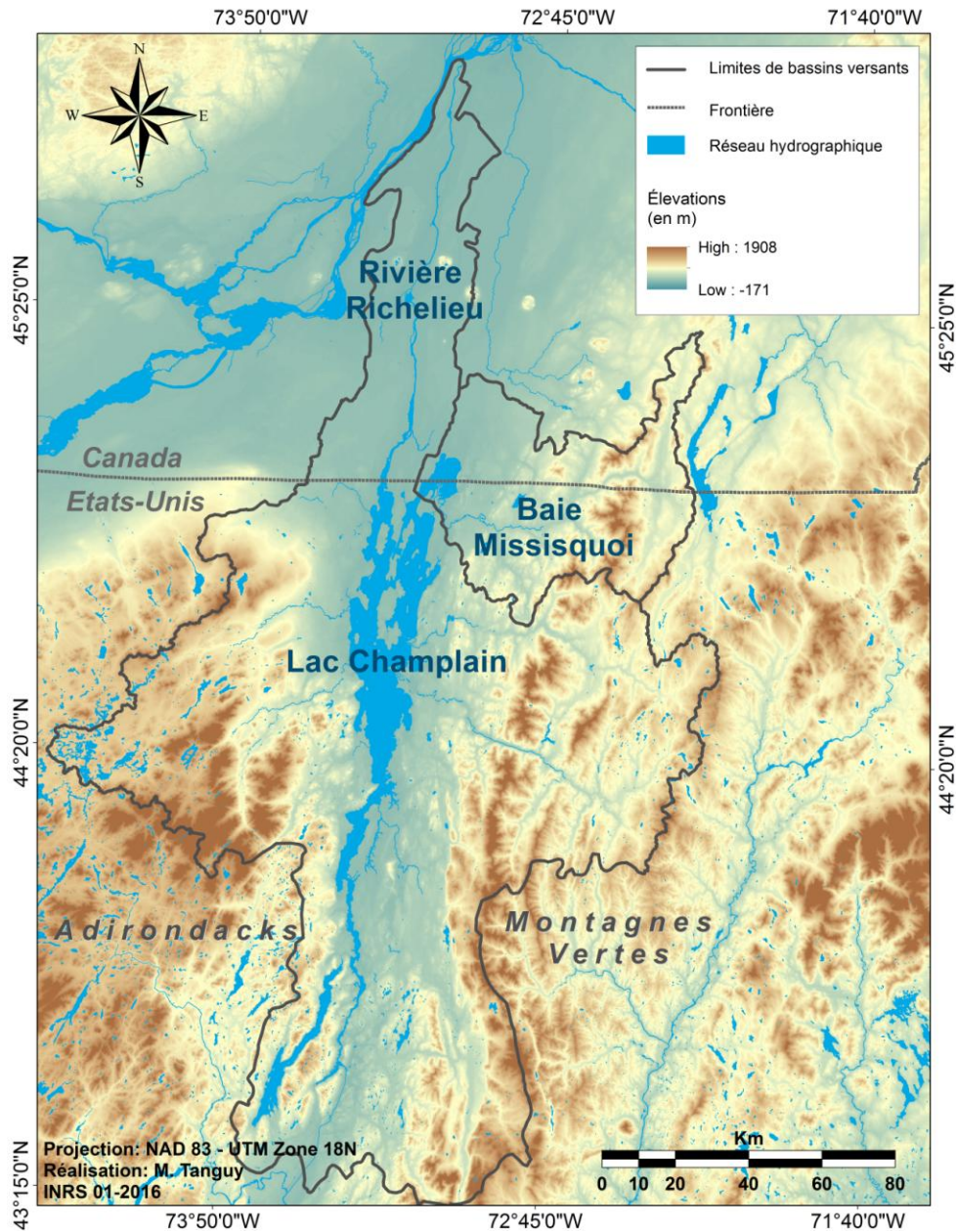


Figure 3.7: Localisation des bassins versants de la rivière Richelieu, de la baie Missisquoi et du lac Champlain

Enfin, le bassin versant de la rivière Richelieu est à forte dominante rurale : 70% des sols sont agricoles, 16% sont forestiers, 6% sont aquatiques et 7% sont urbains (Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu, 2010). Près de 436 000 personnes y habitent, et sont réparties dans 66 villes et municipalités dont les plus peuplées sont Saint-Jean-sur-Richelieu (≈ 92 400 habitants) et Chambly (≈ 25 500 habitants), deux villes qui se sont développées directement en bordure de la rivière.

3.3.2 Inondation de la rivière Richelieu au printemps 2011

La rivière Richelieu a connu, de la fin avril à la fin juin 2011, une inondation sans précédent. Cette inondation est la première d'une telle envergure depuis que les niveaux d'eau et les débits sont enregistrés à différentes stations le long de la rivière, c'est-à-dire depuis 200 ans. Elle a surpris par sa durée exceptionnelle, de près de deux mois, mais aussi par son intensité, de nombreuses zones jusqu'alors jamais inondées ayant été touchées.

Une telle inondation peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, durant l'hiver 2011, l'accumulation de neige a atteint un niveau record dans les Monts Adirondacks et dans les Montagnes Vertes situés aux États-Unis, de part et d'autre du lac Champlain (Medalie *et al.*, 2013). Plus de 4,5 m de neige tassée y ont en effet été mesurés. Cette importante quantité de neige a fondu rapidement sous l'action de précipitations printanières particulièrement abondantes. A titre d'exemple, près de 320 mm de pluie ont été enregistrés entre début avril et fin mai 2011 à la station 7026734 d'Environnement Canada située à Sabrevois (Figure 3.8), alors que les normales climatiques estimées à cette station pour la même période sont de 190 mm. Eaux de pluie et eaux de fonte ont fait augmenter de manière importante les niveaux d'eau dans le lac Champlain et dans la baie Missisquoi, et ainsi dans la rivière Richelieu. De forts vents soufflant vers le nord, et atteignant parfois les 90 km/h, ont également eu pour effet de pousser cette masse d'eau vers le nord et ainsi vers la rivière Richelieu, causant localement d'importants déferlements de vagues et une augmentation de 30 à 35 cm du niveau d'eau à son embouchure (Organisation de la Sécurité Civile du Québec, 2013).

Le seuil d'inondation de 1064 m³/s ou de 27,07 m en niveaux d'eau mesurés à la station Rapid Fryers d'Environnement Canada (station 02OJ007) a été dépassé pour la première fois le 17 avril, avec un débit de 1080 m³/s (27,58 m à la station). La hausse des niveaux d'eau s'est ensuite poursuivie, pour atteindre un maximum historique le 6 mai, avec un débit de 1550 m³/s (27,58 m à la station) (Figure 3.9). Ce n'est que le 2 juin que les niveaux d'eau ont débuté une

véritable diminution. Trois semaines supplémentaires ont été nécessaires pour que le niveau de la rivière repasse enfin sous le seuil d'inondation, le 22 juin.

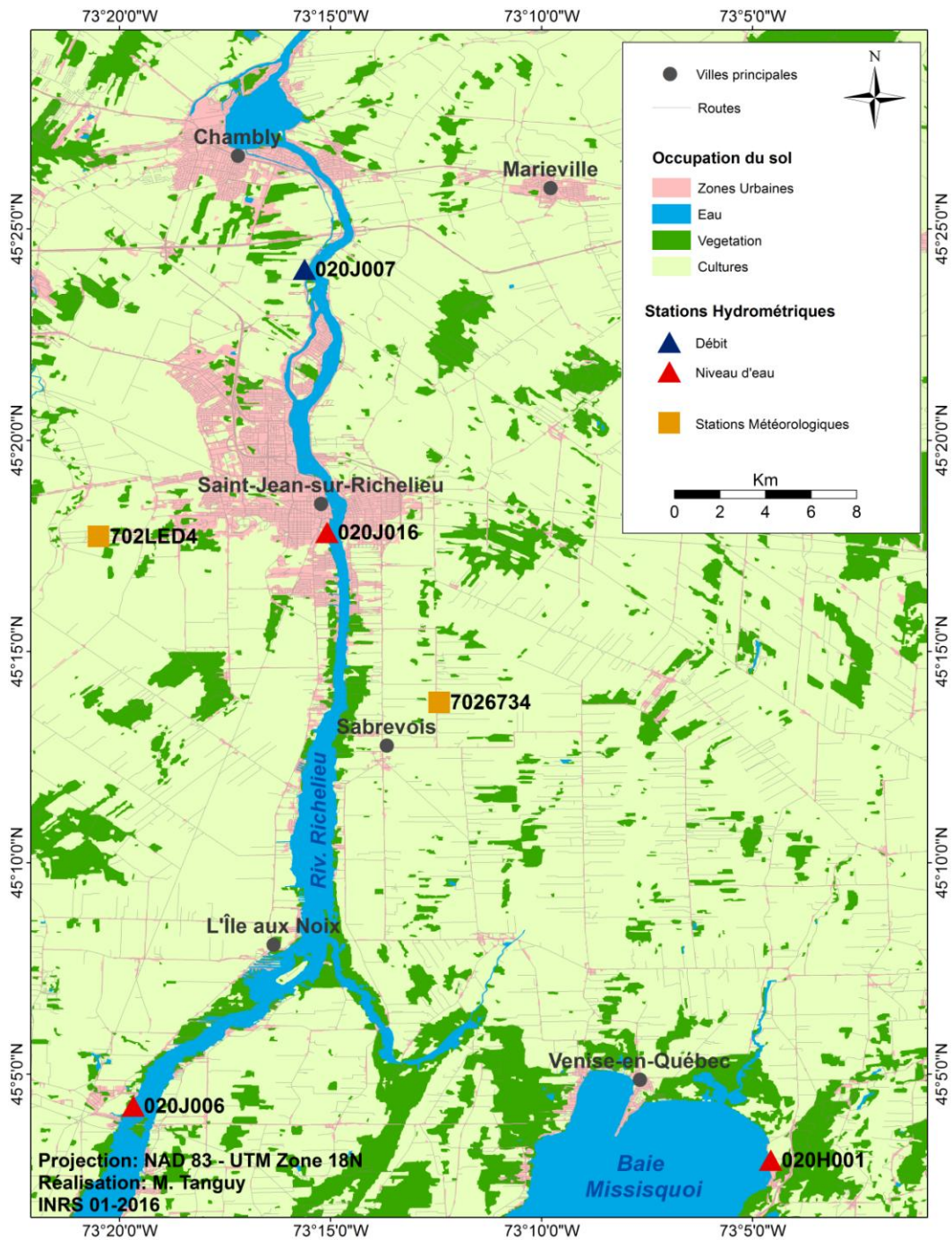
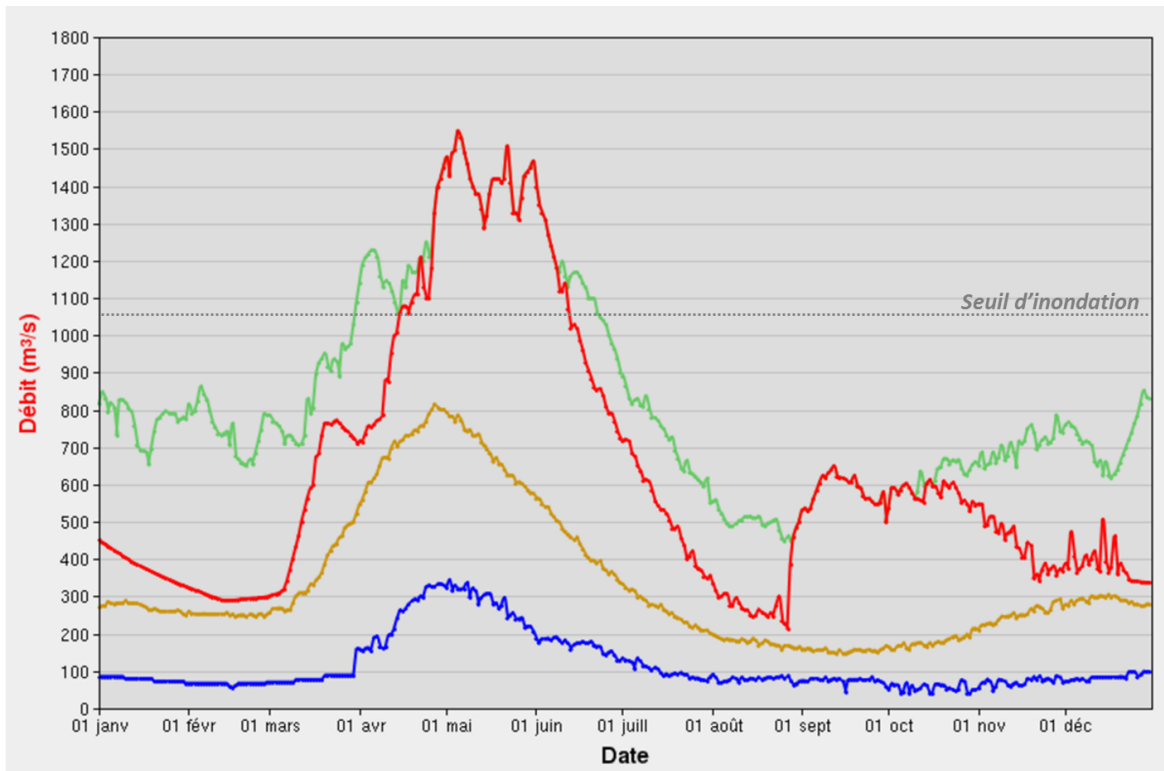


Figure 3.8: Carte de la partie amont de la rivière Richelieu localisant les principales villes dans la région d'étude, ainsi que les stations hydrométriques et météorologiques citées dans ces travaux



Débits (Statistiques correspondant à 78 années de données, de 1937 à 2014)

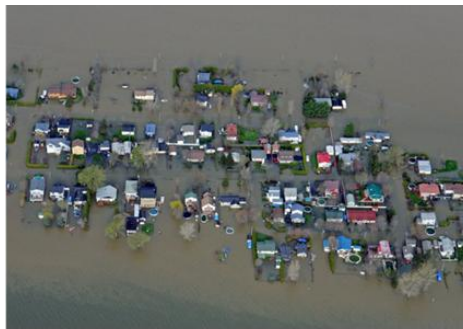
- Données de 2011
- Maximum
- Minimum
- Médian

Figure 3.9: Débits mesurés à la station Rapides Fryers (02OJ007) d'Environnement Canada au cours de l'année 2011, avec les débits maximaux, minimaux et médians estimés à la station entre 1937 et 2014 (Environnement Canada, 2015)

Au maximum de la crue, les inondations s'étendaient du lac Champlain jusqu'à la ville de Beloeil, couvrant ainsi une longueur d'environ 65 km sur une largeur maximum de 22 km. A certains endroits, l'inondation s'étendait à l'intérieur des terres jusqu'à 1 km des berges de la rivière. Les zones les plus touchées par l'inondation se situent en amont de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu, où un haut-fond rocheux a pour effet de ralentir fortement l'écoulement des eaux. Au cours de ce phénomène majeur d'inondation, 40 municipalités ont été touchées, 3927 personnes ont été exposées à l'inondation, 1651 personnes ont été évacuées et 2535 résidences principales ont été endommagées à divers degrés. Au total, les dommages occasionnés ont été chiffrés à plus de 82 millions de dollars. Il s'agit ainsi d'une des plus importantes et surtout des plus longues opérations de sécurité civile au Québec (Organisation

de la Sécurité Civile du Québec, 2013). La Figure 3.10 présente plusieurs prises de vue aériennes réalisées en mai 2011 durant l'inondation. On y voit clairement l'étendue de l'inondation ainsi que des zones résidentielles inondées.

Le choix de la rivière Richelieu comme zone test et de son inondation de 2011 comme cas d'étude, a avant tout été guidé par la disponibilité de données optiques et radar satellitaires, acquises de manière quasi-simultanée au cours de l'inondation. Elles constituent une base de données idéale et rare pour le test et la validation de la méthode de cartographie des zones inondées proposée sur de larges zones urbaines et rurales touchées par les eaux. Ces données optiques et radar satellitaires seront décrites dans la sous-section suivante.



Saint-Jean-sur-Richelieu, 6 mai 2011



Saint-Jean-sur-Richelieu, 11 mai 2011



Sud de Sabrevois, 6 mai 2011

Figure 3.10: Prises de vues aériennes de l'inondation de la rivière Richelieu en mai 2011 (tirée du Journal de Montréal, 2011)

3.4 Données disponibles

Cette section présente l'ensemble des données disponibles pour tester les méthodes de cartographie des zones urbaines et rurales inondées, et d'estimation des hauteurs d'eau en tout point des zones inondées. Les prétraitements appliqués à ces données sont également présentés, ainsi que la banque de données utilisées pour valider les résultats.

3.4.1 Données RADARSAT-2

Le satellite RADARSAT-2 (RS-2) est un satellite commercial canadien, lancé en décembre 2007. Le satellite RS-2 a à son bord un capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) opérant en bande C (5,405 GHz). Il possède une orbite héliosynchrone, avec une inclinaison de 98,6 degrés et une altitude de 798 km, lui permettant de réaliser une orbite par période de 100,7 min. Ce satellite est le successeur de RADARSAT-1 (RS-1) (bande C; 5,3 GHz), lancé en 1995 et officiellement inactif depuis 2013, et dont l'orbite, la trace au sol et le cycle de répétitivité de 24 jours étaient similaires. Le satellite RS-2 possède cependant plusieurs améliorations technologiques par rapport à son prédécesseur (Agence Spatiale Canadienne, 2015). Tout d'abord, si RS-1 ne possédait qu'une orientation de visée à droite, RS-2 possède une visée bidirectionnelle à droite et à gauche, ce qui lui permet d'accroître ses capacités de ré-observation d'une même zone et ainsi d'accroître la disponibilité de données. Il permet de plus de transmettre l'onde radar de manière horizontale (H) ou de manière verticale (V), et de capter l'onde rétrodiffusée de manière horizontale et/ou verticale. Selon le mode d'acquisition sélectionné, le capteur peut ainsi permettre l'acquisition de produits co-polarisés horizontalement (HH) ou verticalement (VV), en polarisation croisée (HV ou VH), en double polarisation (HH+HV ou VV+VH) ou encore en quadruple polarisation (HH+VV+HV+VH). La résolution spatiale de l'image varie ensuite avec le mode dans lequel elle a été acquise. Le mode ScanSAR large permet ainsi d'acquérir des images avec une résolution spatiale maximale de 100 m alors que le mode Spotlight permet l'acquisition d'images ayant une résolution spatiale de 1 m. Enfin, la mission RS-2 possède un service d'acquisitions d'urgence qui permet de programmer dans un délai de 4 h à 12 h l'acquisition prioritaire d'images sur une zone d'intérêt touchée par une catastrophe, sur le premier passage disponible du satellite.

La durée exceptionnelle de l'inondation de la rivière Richelieu au printemps 2011 a permis à Sécurité Publique Canada de faire appel au Centre canadien de Cartographie et d'Observation de la Terre (anciennement Centre Canadien de Télédétection), qui dépend de Ressources

Naturelles Canada, pour planifier l'acquisition d'un grand nombre d'images RS-2. Ces images, dont les dates d'acquisition s'étendent du mois d'avril au mois de juin, ont été mises à notre disposition par le MSP, qui soutient ce projet, en vertu d'un partenariat établi entre Sécurité Publique Canada, l'Agence Spatiale Canadienne et le MSP.

Toutes les images mises à notre disposition (42 au total) n'ont pu être mises à profit dans le cadre de la thèse, et une sélection a dû être opérée. Le critère de sélection principal a été celui de la disponibilité de données de validation. Ainsi, seules les images RS-2 pour lesquelles une image optique de très haute résolution spatiale acquise le même jour ou à une date très proche est disponible, ont été sélectionnées. Ce faible intervalle de temps entre l'acquisition des deux types de données vise à garantir que les étendues des zones inondées qui en sont extraites sont similaires. Un autre critère de sélection a été celui de la résolution spatiale des données RS-2 disponibles : seules les images acquises en mode Fin et Ultra-Fin ont été conservées, leur haute résolution spatiale devant en théorie permettre une détection plus précise des limites des zones inondées en eau libre. Ces critères ont abouti à la sélection de deux images, dont les principaux paramètres d'acquisition sont détaillés au Tableau 3.2.

Tableau 3.2: Paramètres d'acquisition principaux des images RS-2 sélectionnées

Paramètres	Image RADARSAT-2	
Date et heure locale d'acquisition	1 ^{er} Mai 2011 à 07h17	7 Mai 2011 à 18h59
Mode du produit	Ultra-Fin (U72)	Fin (F6F)
Format du Produit	SGF	SLC
Polarisation	HH	HH-HV
Angle d'incidence	22°- 23,5°	47°- 49°
Orbite	Descendante	Ascendante
Nombre de visées	1 x 1	1 x 1
Dimension de la scène (km)	20 x 20	50 x 50
Dimension des pixels (m)*	1,5 x 1,5	4,7 x 5,1
Résolution approximative après ré-échantillonnage (m)	3	8
<i>(*) Distance au sol x azimut</i>		

La première image RS-2 sélectionnée est une image acquise en mode Ultra-Fin (U72) le 1^{er} Mai 2011 à 07h17 heure locale, en polarisation HH et en orbite descendante. Cette image est un produit RSO géoréférencé en mode Fin, ou *SAR Georeferenced Fine-Resolution* (SGF), avec une résolution spatiale approximative de 3 m x 3 m, et un angle d'incidence moyen de 23°. Les données SGF sont des données géocodées, orientées dans la direction de visée du capteur, et dont les valeurs des pixels sont en amplitude.

Au cours des trois jours précédant l'acquisition de l'image et durant l'acquisition, aucune précipitation n'a été enregistrée aux stations d'Environnement Canada 7023270 à Iberville et 7024677 à Marieville (voir la Figure 3.7 pour la localisation de ces stations). Des pluies relativement importantes ont cependant été enregistrées tout au long du mois d'avril, avec environ 130 mm de pluie cumulés. Entre le 25 et le 27 avril, 38 mm de pluies ont été enregistrés, ce qui laisse supposer la présence de sols humides. L'ensemencement des cultures n'ayant pas encore commencé dans les parcelles agricoles de la région à cause du printemps tardif et pluvieux, une très grande partie des champs sont dépourvus de végétation, et n'ont pas encore été labourés (Financière Agricole du Québec, 2012). Au moment de l'acquisition, la vitesse du vent était modérée, avec des vents d'est soufflant à 7 km/h (station 702LED4 à l'Acadie). Cependant, les faibles angles d'incidence comme celui avec lequel cette image a été acquise sont généralement plus sensibles aux effets de la résonance de Bragg. Sur cette image RS-2, cela résulte en une augmentation locale de la rétrodiffusion des zones d'eau libre, comme illustré à la Figure 3.11.

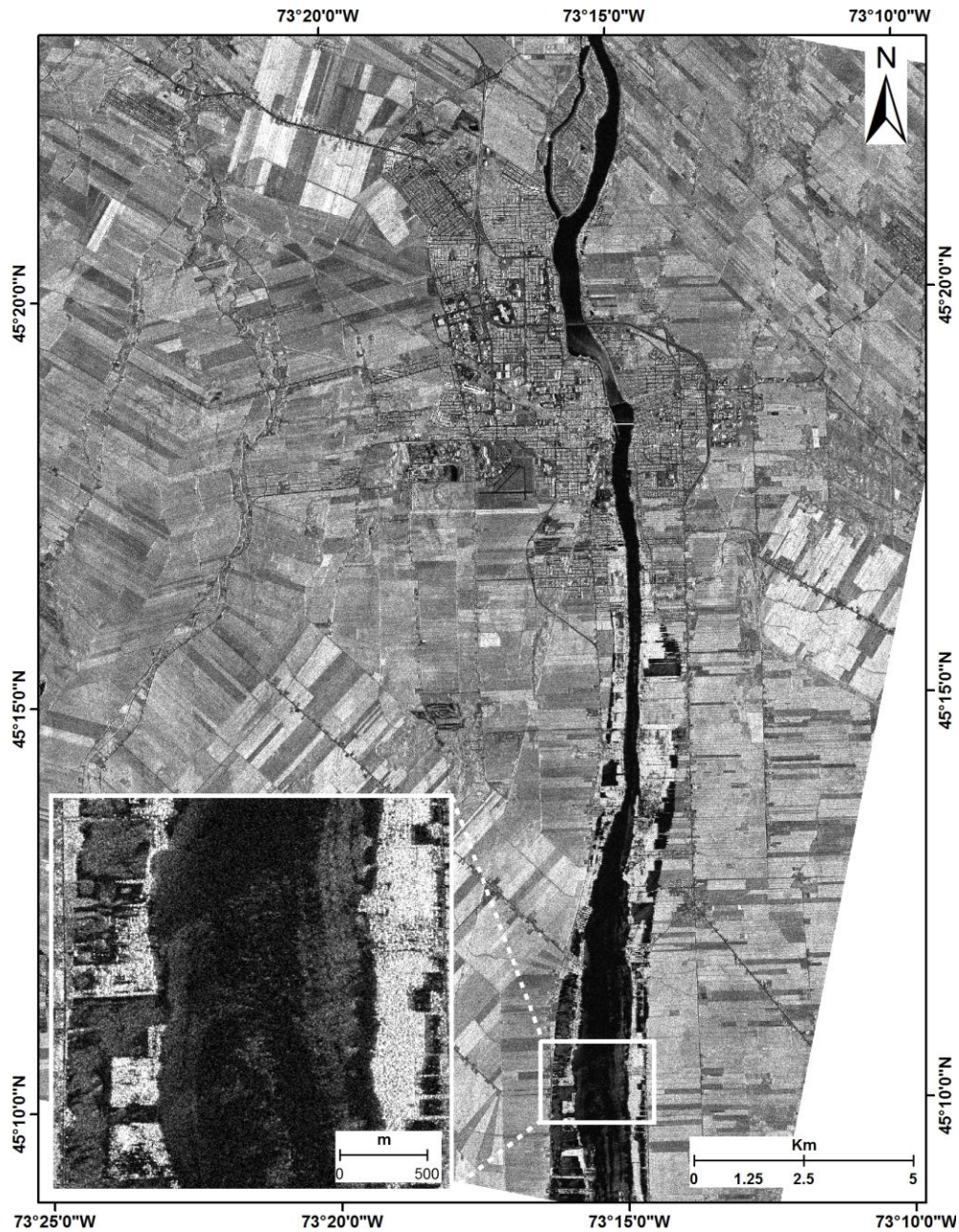


Figure 3.11: Image RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin acquise le 1er mai 2011, et zoom sur une région présentant une augmentation de la rétrodiffusion de la surface de l'eau

La seconde image sélectionnée est une image acquise en mode Fin (mode F6F) le 7 Mai 2011 à 18h59 heure locale, en polarisation HH-HV et en orbite ascendante (Figure 3.12). Cette image est un produit à visée unique complexe ou *Single Look Complex* (SLC), avec une résolution spatiale approximative de 8 m x 8 m, et un angle d'incidence moyen de 48°. Les images en format SLC sont obtenues après le traitement par focalisation des images radar brutes. La

focalisation des données RSO permet, grâce à l'application d'une succession de filtres dans le domaine spectral appliqués en distance et en azimuth, de concentrer les échos dispersés d'un diffuseur dans un pixel, qui sera alors représenté par une valeur d'amplitude et de phase complexe (Arab-Sedze, 2013)

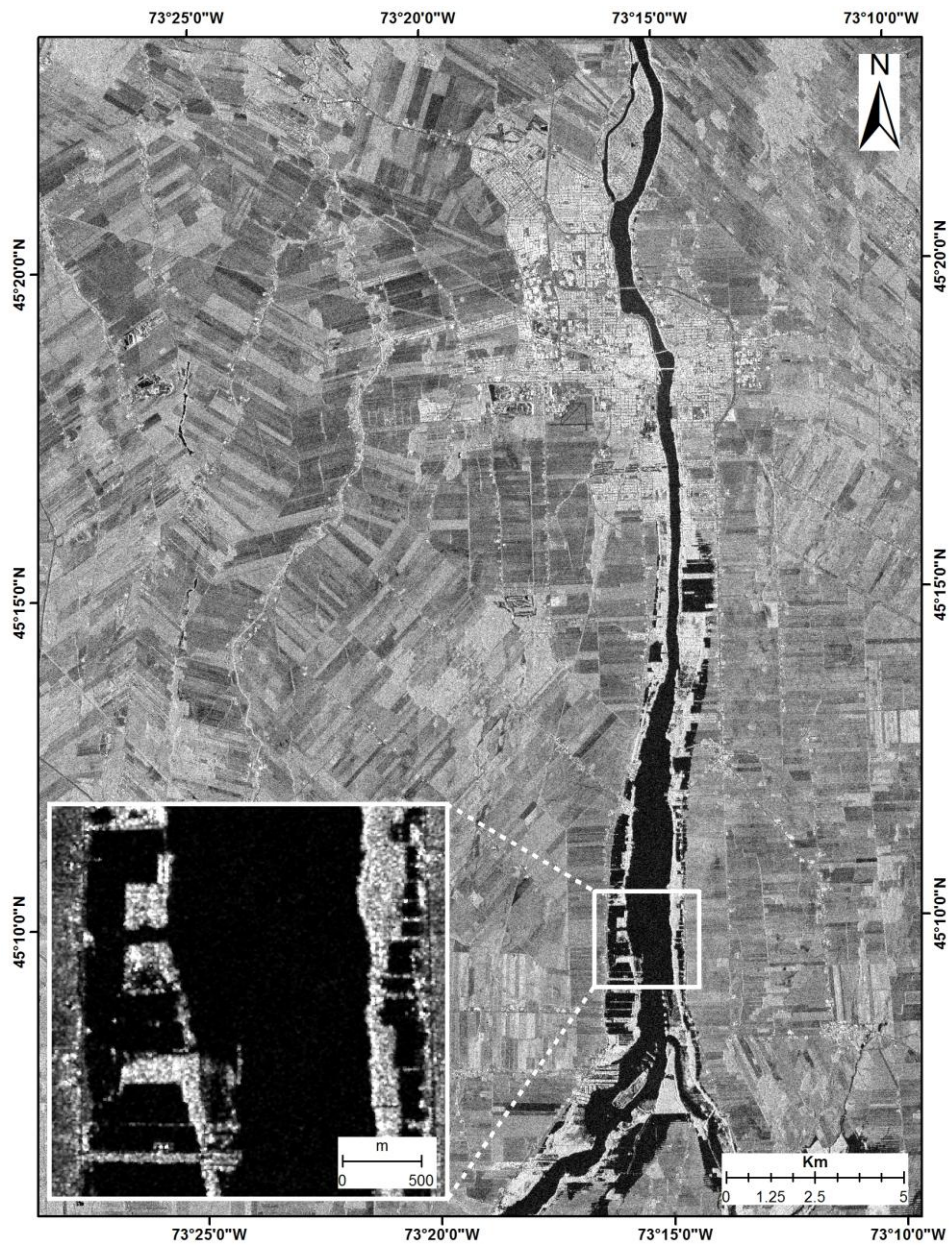


Figure 3.12: Image RADARSAT-2 en mode Fin acquise le 7 mai 2011, et zoom sur une région présentant une rétrodiffusion spéculaire caractéristiques des zones d'eau non affectées par la présence de vent

Aucune précipitation n'a été enregistrée au cours des 24 h avant l'acquisition de l'image ni au moment de l'acquisition (stations 7023270 à Iberville et 7024677 à Marieville). Cependant, des précipitations importantes ont été enregistrées du 3 au 5 mai, avec un total de 70 mm à la station d'Iberville. Ainsi, les sols devaient être humides tant en surface qu'en profondeur au moment de l'acquisition de cette image en mode Fin. Lors de l'acquisition, le vent soufflait du nord-est à une vitesse de 11 km/h (station 702LED4 à l'Acadie). L'angle d'incidence de cette image étant fort, la rugosité de surface de l'eau libre n'apparaît pas de manière évidente comme sur l'image RS-2 du 1^{er} mai, malgré une vitesse des vents légèrement plus élevée. Les plans d'eau libre apparaissent ainsi comme des surfaces uniformes, aux très faibles valeurs de rétrodiffusion. Il est à noter que seule la polarisation HH de cette image RS-2 a été mise à profit, la polarisation HV n'étant pas la plus adaptée pour la détection des zones d'eau libre (section 2.2.1).

Notre approche a donc été testée à l'aide de deux images RS-2 dont les paramètres d'acquisition, mais aussi les conditions de rugosité de surface des plans d'eau, sont différents.

3.4.2 Prétraitement des images RADARSAT-2

a) Filtrage du bruit

Une cellule de résolution, représentée par un pixel sur une image RSO, est constituée d'une infinité de réflecteurs élémentaires, disposés de manière aléatoire et possédant chacun une amplitude a_k et une phase φ_k aléatoires (Bouvet, 2009). La diffusion multiple de l'onde radar incidente par ces réflecteurs produit un phénomène d'interférences constructives (les ondes sont en phase et leurs amplitudes s'additionnent, produisant ainsi des pixels aux tons clairs) et destructives (les ondes sont déphasées et leurs amplitudes s'annulent, produisant ainsi des pixels aux tons foncés). Ce phénomène d'interférences induit une forte dispersion des valeurs de la radiométrie d'une surface pourtant homogène, qui va alors apparaître comme un signal inconstant, produisant une surface à l'aspect granuleux, bruité, sur l'image radar (Lee *et al.*, 2009, Touzi *et al.*, 2004). Cet effet est souvent désigné sous les termes de chatoiement ou de bruit de *speckle*. Si ce bruit peut contenir des informations sur l'organisation spatiale et les caractéristiques diélectriques d'une cellule de résolution, il dégrade la qualité visuelle de l'image RSO et complexifie son exploitation (Amberg, 2005). Il convient donc de l'atténuer, afin d'améliorer la résolution radiométrique de l'image.

Un filtre Gamma-MAP, qui est un filtre adaptatif mono-canal, a été appliqué sur les images RS-2 disponibles (Lopes *et al.*, 1993). Ce filtre a été utilisé à de nombreuses reprises pour le filtrage d'images RSO d'inondations urbaines et rurales (Dewan *et al.*, 2006; Giustarini *et al.*, 2013; Henry, 2004; Martinis *et al.*, 2011; Senthilnath *et al.*, 2013). Ce filtre, développé par Lopes *et al.* (1990) est basé sur l'analyse bayésienne des statistiques de rétrodiffusion de l'image, et utilise une méthode d'estimation par maximum a posteriori pour estimer la réflectivité des pixels de l'image. Il permet de lisser la granularité du bruit tout en préservant la géométrie des objets de l'image, tels que les contours des bâtiments, des zones inondées et autres zones homogènes. C'est donc un avantage majeur pour le processus de segmentation multi-résolution qui doit être appliqué au cours des étapes de traitement des images d'inondation. Ce filtre permet de plus de réduire l'étendue des valeurs de rétrodiffusion associées avec l'eau libre, et ainsi d'obtenir une meilleure séparabilité des rétrodiffusions des différentes classes d'occupation du sol (Martinis *et al.*, 2011). Afin de préserver les détails de l'image, tout en filtrant de manière efficace l'image RSO, une fenêtre de petite taille est généralement recommandée (Lee *et al.*, 1994). Trois tailles de fenêtre ont ainsi été testées, à savoir 3 x 3, 5 x 5 et 7 x 7. Les effets de ces trois tailles de fenêtres sur le bruit de l'image et sur la préservation de la géométrie des objets ont été analysés visuellement. La fenêtre de taille 3 x 3 ne permet pas une réduction suffisamment efficace du bruit de l'image, alors que la fenêtre de taille 7 x 7 tend à lisser de manière un peu plus importante les détails de l'image. Une fenêtre de taille 5 x 5, qui permet d'obtenir un meilleur compromis entre la préservation des détails et un filtrage efficace du bruit, a donc été préférée.

b) Conversion des coefficients de rétrodiffusion en décibels

Les images RS-2 fournies à l'utilisateur sont des données déjà calibrées. Cela signifie que les comptes numériques de l'image, qui sont une mesure de l'amplitude du champ électrique reçu par l'antenne pour chaque pixel de l'image radar, ont déjà été transformés en coefficients de rétrodiffusion (σ^0), et cela pour chaque polarisation. Le coefficient de rétrodiffusion σ^0 de chaque pixel est une grandeur sans dimension, qui dépend des paramètres du capteur au moment de l'acquisition (longueur d'onde, polarisation, angle d'incidence) mais aussi des paramètres physiques de la surface imagée (rugosité de surface, humidité, orientation par rapport à la direction de visée du capteur). Cependant, les coefficients de rétrodiffusion des pixels de l'image s'expriment généralement en décibels (dB) et pas en puissance, comme c'est le cas sur les images RS-2 lors de leur livraison. La segmentation orientée-objets des images

RS-2 ne produisant de plus pas de bons résultats sur les images en puissance, les coefficients de rétrodiffusion des pixels de chaque polarisation des images ont été convertis en dB à l'aide de la relation suivante (équation 14) :

$$\sigma_{ij}^0 \text{ (dB)} = 10 \times \log_{10} \left(\sigma_{ij}^0(\text{P}) \right) \quad (14)$$

Où : $\sigma_{ij}^0(\text{P})$ représente la rétrodiffusion du pixel (i, j) en puissance.

c) Correction géométrique

Les images de télédétection sont affectées par un certain nombre de distorsions géométriques, liées à la plate-forme d'acquisition des images, au capteur et à la surface terrestre (Girard, 2010). Différents modèles et fonctions géométriques permettent de corriger ces distorsions géométriques et de retrouver dans une certaine mesure la réalité géographique du terrain. Parmi ces modèles, on peut distinguer les modèles empiriques 2D/3D des modèles physiques 2D/3D (Toutin, 2004). Les modèles empiriques 2D/3D, telles que les fonctions polynomiales 2D et 3D ou encore les fonctions rationnelles 3D, ne s'intéressent pas aux mécanismes à l'origine des distorsions et ne nécessitent pas d'information a priori sur les caractéristiques du système. A l'inverse, les modèles physiques 2D/3D, considérés comme plus robustes, modélisent de manière mathématique ces différentes sources de distorsions, et requièrent des informations sur les caractéristiques du système imageur. Le modèle de Toutin (Toutin, 1995; Toutin *et al.*, 2009), qui a été utilisé pour la correction géométrique des images RS-2 disponibles dans cette étude, est un de ces modèles physiques. Ce modèle radargrammétrique 3D intègre simultanément et dans un seul modèle mathématique l'ensemble des distorsions géométriques et la géométrie d'acquisition de l'image. L'approximation des valeurs du modèle ainsi que le calcul des paramètres d'orbite sont basés sur les paramètres d'acquisition inclus dans les métadonnées de l'image. Le calcul des paramètres d'orbite est renforcé par l'intégration des lois de mécanique céleste de Lagrange pour une orbite perturbée.

Ce modèle est intégré au modèle *Satellite Orbital Modelling*, dans le logiciel PCI Geomatica. Il permet de réaliser l'ortho-rectification d'images satellite radar de moyenne et de haute résolution spatiale, tels que ASAR (ENVISAT), COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, RS-1 et RS-2. Pour réaliser l'ortho-rectification des images RS-2 utilisées dans ce projet, un modèle numérique d'altitude

d'une résolution de 10 m, issu de la Base de Données Topographiques du Québec, a été utilisé. Afin d'améliorer l'ortho-rectification des images, et de s'assurer de la superposition de l'ensemble des données optiques et RSO utilisées, un ajustement manuel a par la suite été réalisé, à l'aide de la méthode *Adjust Orthos* du logiciel PCI Geomatica. Ce modèle permet de réduire les erreurs d'alignement entre les images ortho-rectifiées à l'aide d'une méthode de Spline en Plaque Mince (PCI Geomatica, 2005). Les points de contrôle au sol (PCS) ont été récoltés à l'aide de données vectorielles du réseau routier issues de la Banque de Données Thématiques du Québec (BDTQ) et de l'image IKONOS-2 acquise le 8 mai 2011 et déjà géoréférencée (cette image, utilisée pour l'extraction des données de validation, sera présentée à la section 3.5.4).

Finalement, les images ont été géoréférencées dans le système de coordonnées UTM (*Universal Transverse Mercator*), zone 18 Nord, dans le système de référence géodésique NAD83 (*North American Datum de 1983*). Le Tableau 3.3 présente le nombre de points d'appui utilisés pour la correction géométrique de chaque image RS-2 ainsi que la précision de la correction obtenue.

Tableau 3.3: Nombre de points de contrôle et précision de la correction géométrique obtenue pour les images RADARSAT-2 à l'aide du modèle de Toutin et d'un ajustement manuel

Image RADARSAT-2	Nombre de PCS	RMS X (pixel)	RMS Y (pixel)	RMS (pixel)
Ultra-Fin	18	0,41	0,45	0,65
Fin	15	0,54	0,61	0,82

d) Création de sous-images

L'algorithme de segmentation multi-résolution utilisé pour la segmentation des images RS-2 en objets peut être un processus long si toute l'image radar est soumise à la segmentation. La création d'une sous-image de plus petite superficie peut permettre de réduire de manière très significative les délais nécessaires au processus de segmentation. Ainsi, les superficies des images RADARSAT-2 soumises à la segmentation ont été réduites à l'aide du logiciel PCI Geomatica, en prenant soin de conserver l'ensemble des zones inondées dans les sous-

images. La superficie couverte par chaque sous-image est représentée par un rectangle rouge dans la Figure 3.13.

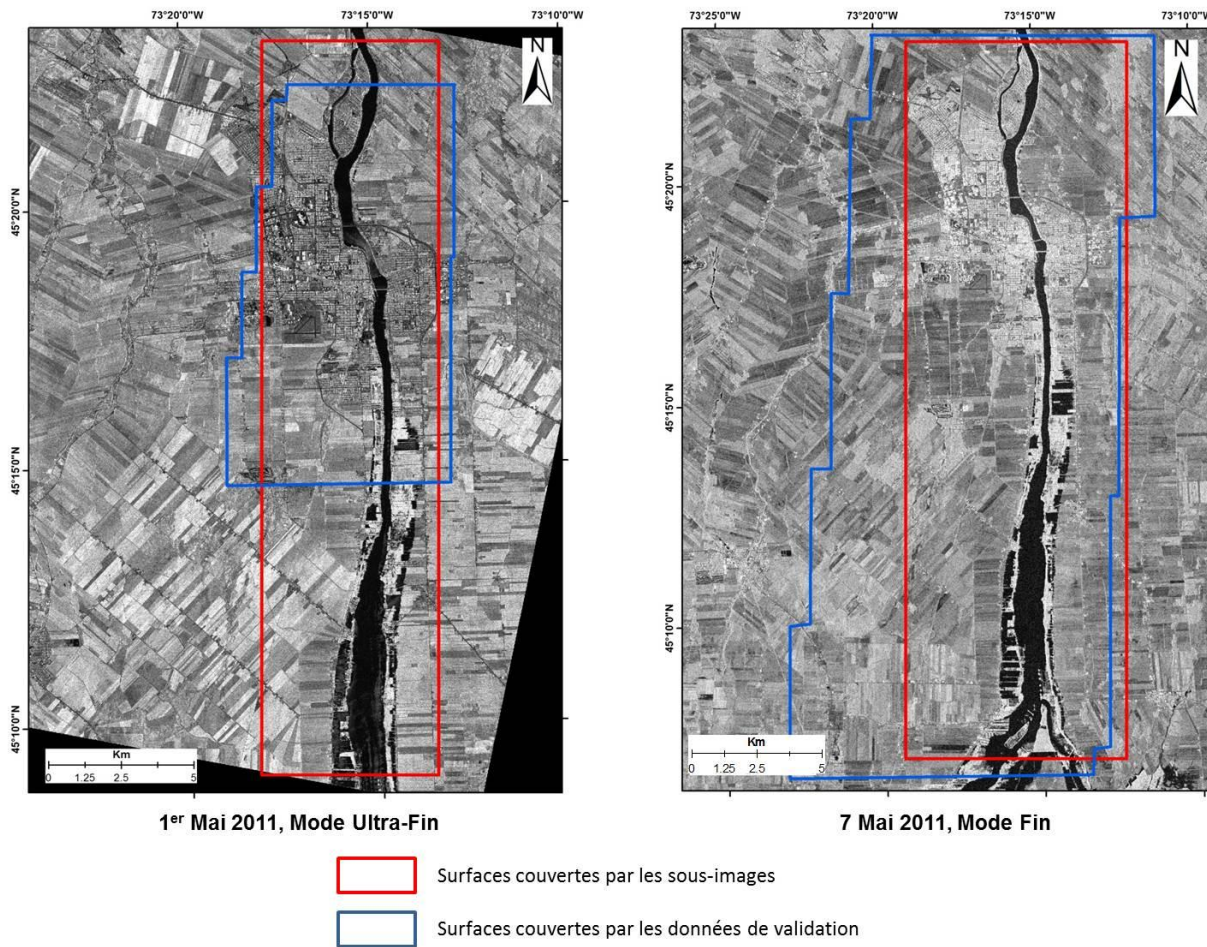


Figure 3.13: Surfaces couvertes par les sous-images créées à partir des images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin, ainsi que les surfaces couvertes par les données de validation associées à chaque image RADARSAT-2

Le Tableau 3.4 donne les dimensions en nombre de lignes et de colonnes initiales, puis réduites, des deux images RS-2 utilisées, ainsi que les temps nécessaires à la segmentation multi-résolution pour chaque dimension d'image. Les temps nécessaires à la segmentation sont fortement réduits lorsque des sous-images sont utilisées.

Tableau 3.4: Taille initiale et taille réduite des images RADARSAT-2, et durée de la segmentation multi-résolution pour chaque taille d'image

Image RS-2	Taille Initiale* <i>(nbr colonnes x lignes)</i>	Durée Segmentation <i>(en min)</i>	Taille Réduite <i>(nbr lignes x colonnes)</i>	Durée segmentation <i>(en min)</i>
Ultra-Fin	9238 x 10337	17	3474x8494	7
Fin	7960 x 9525	19	2147x6938	5
<i>*Taille des images après correction géométrique</i>				

3.4.3 Données nécessaires à la production de la carte des intervalles de récurrence d'inondation

Les données disponibles pour la production de la carte des intervalles de récurrence d'inondation de la section de la rivière Richelieu étudiée sont :

- Un MNT de très haute résolution horizontale (1 m) et avec une précision altimétrique de ± 15 cm;
- Les limites des plaines inondables de récurrence 2, 20 et 100 ans;
- Les cotes de crues associées à chaque récurrence d'inondation au centre de la rivière.

Les sources de ces données ainsi que les différents traitements qui leur ont été appliqués sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

a) Modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT de la zone d'étude a été créé à partir de données d'élévation mesurées à l'aide d'un système laser aéroporté (ou LIDAR pour Light Detection And Ranging) au cours d'une campagne de relevés sur l'ensemble du secteur sud-est de la Montérégie, d'avril à juin 2013. L'acquisition de ces données a été commandée par un groupement régional d'achat dont le maître d'œuvre est l'organisme à but non lucratif Géomont.

La technique LIDAR est une technique de télédétection optique active de mesure à distance. L'onde émise par le capteur se situe dans un domaine de transparence de l'atmosphère, soit dans des longueurs d'onde variant de 0,3 μm à 10 μm , correspondant aux longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge. La technique LIDAR consiste en la mesure de la période précise s'écoulant entre l'émission de l'impulsion laser depuis le capteur et sa réception par les récepteurs du capteur, après sa réflexion par un objet. La vitesse de propagation de l'onde dans le vide étant connue, cette période permet de calculer avec précision la distance entre le capteur et la cible. Cette distance, couplée à la direction du faisceau et à la position GPS du capteur, permet l'obtention de points tridimensionnels de haute précision (coordonnées planimétriques x, y, et coordonnée altimétrique z) de la cible au sol (Bonnet *et al.*, 2013). Les capteurs LIDAR pouvant également mesurer la réflectance du signal, il est possible d'obtenir une information spectrale des objets de réflexion et de leur attribuer une classe (ex : sol nu, végétation, bâtiments, eau), définie à l'aide de codes numériques entiers.

Les données d'élévation ont été fournies sous forme de points laser (points .las), dont la densité théorique est d'un point par m^2 au sol. L'erreur verticale propre au système de positionnement aéroporté est d'environ 3 cm. Cependant, les propriétés du sol et de son occupation influencent la qualité du signal retourné au capteur. On considère ainsi que la précision altimétrique des points est de ± 15 cm en milieu dégagé et de ± 25 cm en milieu boisé. La précision planimétrique des points est quant à elle de 15 cm.

Ces points ont été préalablement nettoyés du bruit et des artefacts potentiels par le producteur de données, et ont été classés selon l'ordre de retour du signal laser, à savoir premiers retours, derniers retours, retours singuliers et retours intermédiaires (voir Tableau 3.5). Les données ont été transmises dans le système de référence Mercator Transverse Modifiée (MTM), fuseau 08, avec le datum horizontal NAD83 SCRS et le datum vertical CGVD28.

Le MNT de la zone d'étude a été créé à partir des points correspondant au dernier retour du signal. Les différentes étapes menant à la génération de la surface raster à partir des points .las ont été réalisées à l'aide de l'outil « las dataset » d'ArcGis 10.3. Le MNT créé a une résolution spatiale de 1 m et une précision verticale de ± 15 cm. Sa projection géographique est identique à celles des données RS-2, à savoir UTM zone 18 Nord, avec un datum horizontal NAD83 SCRS et un datum vertical CGVD28.

Tableau 3.5: Classes de retour LIDAR et leurs associations

LIDAR – Classe de retour	Association
Premier retour	Entité la plus haute du paysage <i>Ex : cime des arbres, bâtiments</i>
Dernier retour	Généralement, le sol
Retours intermédiaires	Structures sous-jacentes des objets au sol <i>Ex : structure de la végétation</i>
Retours singuliers	Un seul retour mesuré par impulsion

La production des données LIDAR étant encore assez coûteuse, elles ne sont pas disponibles pour l'ensemble du territoire du Québec. C'est également le cas dans le reste du Canada, et plus largement dans le reste du monde. Cependant, la carte de la couverture LIDAR aéroportée disponible au Québec (Néogis, 2015), présentée dans la Figure 3.14, montre qu'une grande partie des zones les plus habitées du sud du Québec est couverte par ces données. Selon Néogis (2015), plus de 78 000 km² ont déjà été couverts par du LIDAR aéroporté au Québec, ce qui inclut 92% des Basses-Terres du Saint-Laurent, 60% de la zone agricole de la province et 80% de ses surfaces habitées. De très nombreuses zones où le risque d'inondation est présent sont donc couvertes par ces données. Toutefois, ces relevés LIDAR ayant été réalisés au cours de différentes campagnes, ils n'ont pas tous les mêmes précisions altimétriques et planimétriques, ni le même nombre de points de captage théoriques par m². Les MNT générés à partir de ces relevés restent cependant d'une très grande précision altimétrique et planimétrique. Enfin, le Gouvernement du Québec a annoncé, dans son Plan économique du Québec 2016, un nouveau mandat visant à acquérir de l'information en données LIDAR sur l'ensemble du Québec méridional (au sud du 50^{ème} parallèle). Ce mandat vise à acquérir ces informations sur un total de près de 300 000 km² d'ici à 2021 (Gouvernement du Québec, 2016).

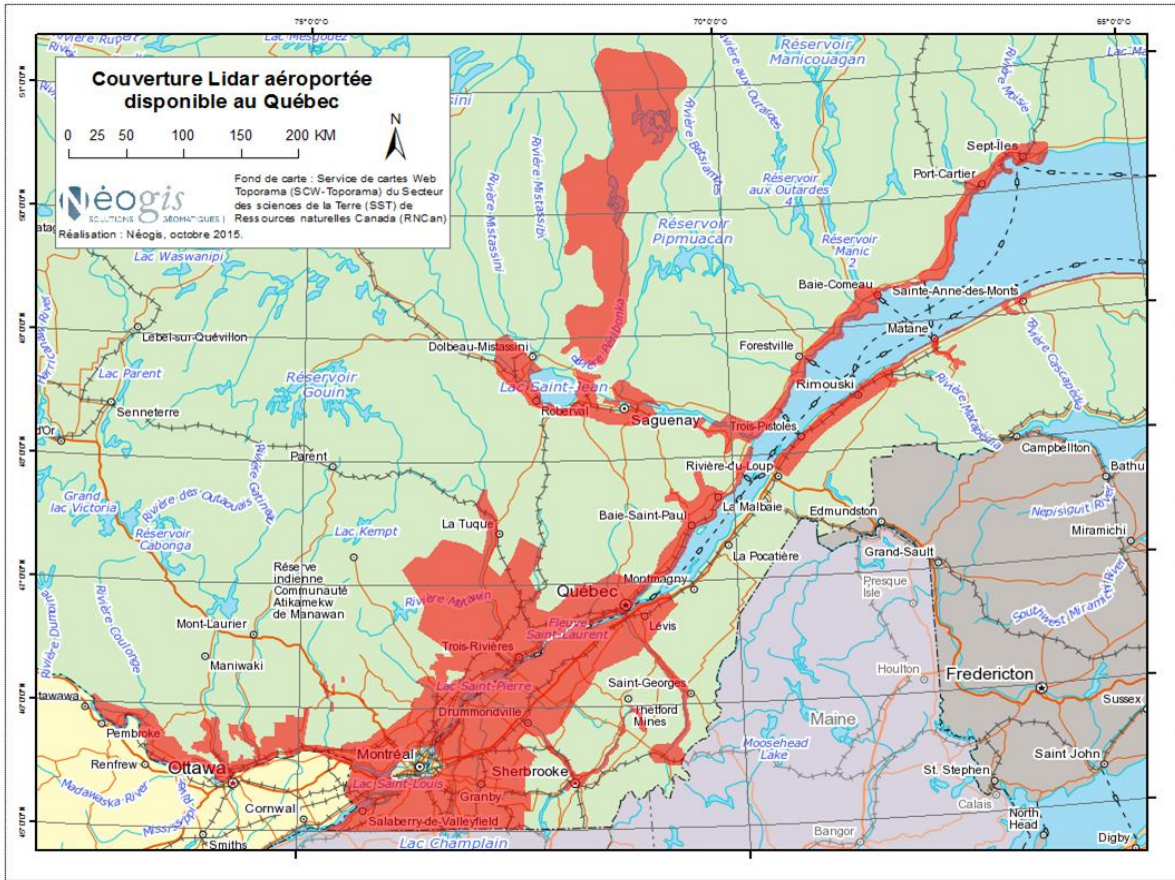


Figure 3.14: Couverture LIDAR aéroportée disponible au Québec (tirée de Néogis, 2015)

Des données d'élévation couvrant l'ensemble du territoire canadien sont également disponibles gratuitement sur des sites internet gouvernementaux, mais leur résolution spatiale et leur précision verticale ne sont pas adaptées à l'estimation des intervalles de récurrence d'inondation en tout point de la zone d'étude ni à l'extraction des hauteurs d'eau. Le site de Ressources Naturelles Canada, qui héberge la base de données géospatiales GéoGratis, propose par exemple des données d'élévation d'une résolution spatiale variable selon les zones, mais dépassant dans tous les cas les 15 m. La précision altimétrique et planimétrique de ces données est supérieure à 5 m. Des données d'élévation générées à l'issue de la mission SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA existent également pour une grande partie du globe, mais leur résolution spatiale est dans le meilleur des cas égale à 30 m, et leur précision moyenne est supérieure à 10 m. La mission TanDEM-X, mise en place en 2010 et composée des satellites TerraSAR-X et TanDEM-X, a cependant permis l'acquisition d'images interférométriques de haute résolution de la surface terrestre, avec pour but premier la

génération d'un modèle numérique d'élévation de haute précision de la terre (Earth Observation Portal Directory, 2016). Ces données d'élévation ont une résolution spatiale de 12 m, avec une précision verticale relative de 2 m (10 m en précision absolue), et une précision horizontale relative de 3 m (10 m en absolu). Elles sont maintenant disponibles commercialement par l'intermédiaire de la base de données WorldDEM.

b) Limites des plaines inondables

Les limites des plaines inondables disponibles pour le secteur étudié de la rivière Richelieu sont celles associées aux cotes de crues de récurrence 2 ans, 20 ans et 100 ans. Ces données ont été produites en 2006 dans le cadre du Programme de Détermination des Cotes de Crues (PDCC) mené par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) du ministère de l'Environnement du Québec.

La détermination des cotes de crues pour le secteur de la rivière Richelieu allant du lac Champlain au niveau de la frontière entre le Québec et les États-Unis s'est faite en deux étapes. Une version synthétique en est ici donnée, les détails de ces deux étapes ainsi que leurs résultats étant disponibles dans le rapport de révision des cotes de crues de la rivière Richelieu du CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2006).

Tout d'abord, une étude hydrologique a permis d'estimer les débits de crues de récurrence 2, 20 et 100 ans de ce secteur de rivière. L'étude hydrologique a été réalisée par l'intermédiaire d'une analyse statistique basée sur un total de 28 valeurs de débits maximaux annuels enregistrés à la station 02OJ007 située à Carignan. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel d'ajustement des lois statistiques HYFRAN (Chaire en Hydrologie Statistique, 2002). La loi statistique Log-Pearson type III a été retenue pour estimer les différentes valeurs de crues. Une analyse statistique a été réalisée à l'aide d'une série de 29 valeurs de niveaux maximaux annuels enregistrés à la station 02OH001 située à Saint-Armand, pour déterminer les niveaux d'eau de crue de récurrence pour la baie Missisquoi, au nord-est du lac Champlain. Afin de vérifier la cohérence des analyses réalisées sur les valeurs enregistrées à ces deux stations, des analyses statistiques ont également été menées sur les données de niveaux maximaux annuels enregistrés à la station 02OJ016 à Saint-Jean-sur-Richelieu (26 valeurs utilisées) et à la station 02OJ006 à Lacolle (20 valeurs utilisées). Les valeurs retenues pour les débits et les

niveaux de crues de récurrence de 2 ans, 20 ans et 100 ans, ainsi que les lois statistiques retenues pour leur estimation, sont présentées au Tableau 3.6.

Une étude hydraulique a par la suite été menée pour déterminer les cotes de crues de récurrence 2 ans, 20 ans et 100 ans nécessaires à la détermination des plaines inondables le long de la rivière. La méthode utilisée pour déterminer ces cotes de crues est une méthode de relations niveau-débit et niveau-niveau.

Les cotes de crues de récurrence 2, 20 et 100 ans ont tout d'abord été établies à quatre sites de référence à l'aide d'une relation niveau-débit. Ces sites ont été sélectionnés en fonction de la qualité et de la quantité de mesures de niveaux d'eau réalisés préalablement par arpentage sur le terrain en période de crue. Ces mesures ainsi que les débits de récurrences 2, 20 et 100 ans précédemment calculés sont utilisés pour l'estimation de la relation niveau-débit à chaque site de référence.

Tableau 3.6: Débits et niveaux d'eau selon la récurrence estimés pour différentes stations et loi statistique retenue

Station	Loi statistique	Débit (m^3s^{-1}) selon la récurrence		
		2 ans	20 ans	100 ans
02OJ007	Log-Pearson type III	931,6	1258,3	1368,8
Niveau d'eau (en m) selon la récurrence*				
02OH001	Log-Pearson type III	30,32	31,00	31,25
02OJ006	Log-Pearson type III	30,19	30,78	31,01
02OJ016	Log-Pearson type III	29,85	30,37	30,54
* Constante géodésique incluse				

Les cotes de crues estimées à chacun de ces sites ont ensuite permis de déterminer les cotes de crues à un certain nombre d'autres sites d'observations, identifiés le long de la rivière selon ses caractéristiques géomorphologiques locales (changements de pente, présence d'un tributaire, d'un obstacle, etc.). Pour cela, des relations entre les niveaux d'eau mesurés à chaque site d'observation en période de crue et les niveaux d'eaux relevés aux sites de référence qui lui sont rattachés ont été établies (relation niveau-niveau). Cela a permis d'obtenir les cotes de crues de récurrence de 2 ans, 20 ans et 100 ans pour tous les sites d'observation

le long de la rivière. Enfin, un modèle numérique d'élévation d'une précision planimétrique et altimétrique de ± 15 cm a été créé à partir des relevés topographiques laser aéroportés effectués de part et d'autres du tronçon de la rivière. Une modélisation hydraulique 1D, exploitant ces données d'élévation et les estimations de niveaux d'eau associées à chaque récurrence d'inondation aux différentes sections définies le long de la rivière, a ensuite été utilisée pour délimiter les plaines inondables de récurrence 2 ans, 20 ans et 100 ans. Chaque surface d'eau de récurrence a été simulée à l'aide d'une méthode d'interpolation par pondération par inverse de la distance, à l'aide du logiciel HEC-RAS. Les représentations cartographiques des limites des plaines inondables sont produites à l'échelle 1:2 000.

Le CEHQ fournit les limites de ces trois plaines inondables sous forme de vecteurs, en coordonnées géographiques, selon l'ellipsoïde de référence GRS80 et le système de référence géodésique NAD83. Après avoir redéfini leur projection géographique, les vecteurs ont été densifiés, afin d'obtenir un plus grand nombre de sommets le long de ces vecteurs. La densité de ces sommets est de 1 m par 5 m. Ils ont ensuite été convertis en points, dont l'élévation est extraite à l'aide du MNT présenté dans la partie a) de cette sous-section. Ces différents traitements permettent d'obtenir un plus grand nombre de points d'élévation à partir desquels les surfaces d'eau associées à chaque récurrence d'inondation seront interpolées. Il aurait été possible d'augmenter encore la densité des points jusqu'à 1 point par m. Cependant, le nombre de points générés sur l'ensemble de la zone d'étude aurait été trop important (plusieurs dizaines de millions) pour garantir la production de la carte des intervalles de récurrence d'inondation dans des délais convenables.

c) Cotes de crues associées à chaque récurrence d'inondation au centre de la rivière

Les cotes de crues au centre de la rivière associées aux inondations de récurrence 2 ans, 20 ans et 100 ans ont été produites en 2006 par le CEHQ dans le cadre du PDCC de la rivière Richelieu. Les estimations des cotes de crues aux différents sites d'observation situés le long de la rivière ont permis la création de profils de plan d'eau pour chaque récurrence d'inondation sur toute la longueur de la section de rivière étudiée. Il a alors été aisé d'estimer l'élévation de chaque profil de plan d'eau de récurrence à différents points situés au centre de la rivière.

Les points cotés au centre de la rivière sont distants d'1 km, ce qui n'a pas été jugé adéquat pour permettre une interpolation précise des élévations des surfaces d'eau au centre de la rivière. Ces points ont donc été densifiés, pour obtenir une plus grande série de points cotés distants de 20 m. L'élévation du profil de plan d'eau a été estimée pour chaque point à partir d'une fonction d'interpolation linéaire par inverse de la distance utilisant les points dont les cotes sont déjà connues, et cela pour chaque récurrence d'inondation. Enfin, leurs coordonnées x et y leur ont été attachées.

Les limites des plaines inondables de récurrence ainsi que les cotes de crue au centre de la rivière ont été estimées par le CEHQ pour près de 5 800 km de cours d'eau au Québec (MM Group Limited, 2014). Ce sont ainsi près de 600 secteurs de rivières exposées au risque d'inondation qui ont été couverts de 1979 à 2010. Ces secteurs sont en grande majorité situés près de zones habitées, pour lesquelles la présence de l'aléa inondation est connue. Selon les zones, ces données sont disponibles à l'échelle 1 :2 000, 1 :4 000 ou encore 1 :10 000, l'échelle la plus fine correspondant aux données générées ou mise à jour récemment. Les dates auxquelles les données de cotes de crue disponibles ont été estimées sont assez disparates. Si un grand nombre de tronçons de rivière a fait l'objet de révisions entre les années 2000 et 2010, dans le cadre du PDCC, certaines données n'ont pas été mises à jour depuis leur création à la fin des années 1970 et au cours des années 1980. Des révisions ou de nouvelles estimations sont cependant réalisées régulièrement sur différents tronçons de rivière, par le CEHQ mais aussi par des organismes privés. La Figure 3.15 présente une carte localisant les secteurs couverts par ces données, ainsi que leurs échelles. On doit de plus ajouter que les Municipalités Régionales de Comté du Québec ainsi que les municipalités peuvent faire réaliser de nouvelles études ou encore faire modifier les études existantes. Ces données ne sont pas présentées dans la Figure 3.15. Un rapport réalisé par MM Group Limited (2014) a également montré que les limites des plaines inondables sont disponibles pour un très grand nombre de rivières équipées de stations hydrométriques de jaugeage dans les autres provinces du Canada mais aussi dans plusieurs autres pays tels que les États-Unis, le Royaume-Uni, la France, l'Allemagne, l'Australie, la Nouvelle-Zélande, etc. Selon ce même rapport, au moins 3 limites de plaines inondables sont considérées dans tous les pays, bien que certains, comme l'Allemagne, en considèrent jusqu'à 5 (à savoir de récurrence 10 ans; 30 ans; 50 ans; 100 ans et 300 ans). Cependant, les échelles auxquelles ces données sont disponibles peuvent varier d'un pays à l'autre, mais aussi à l'intérieur d'un même pays. Ainsi, des données relatives aux limites de plaines inondables de différentes récurrences sont disponibles pour un grand nombre de

sections de rivières au Québec et ailleurs dans le monde. Leur précision et le fait qu'elles soient à jour ne peuvent cependant pas être garantis pour toutes les rivières à risque d'inondation.

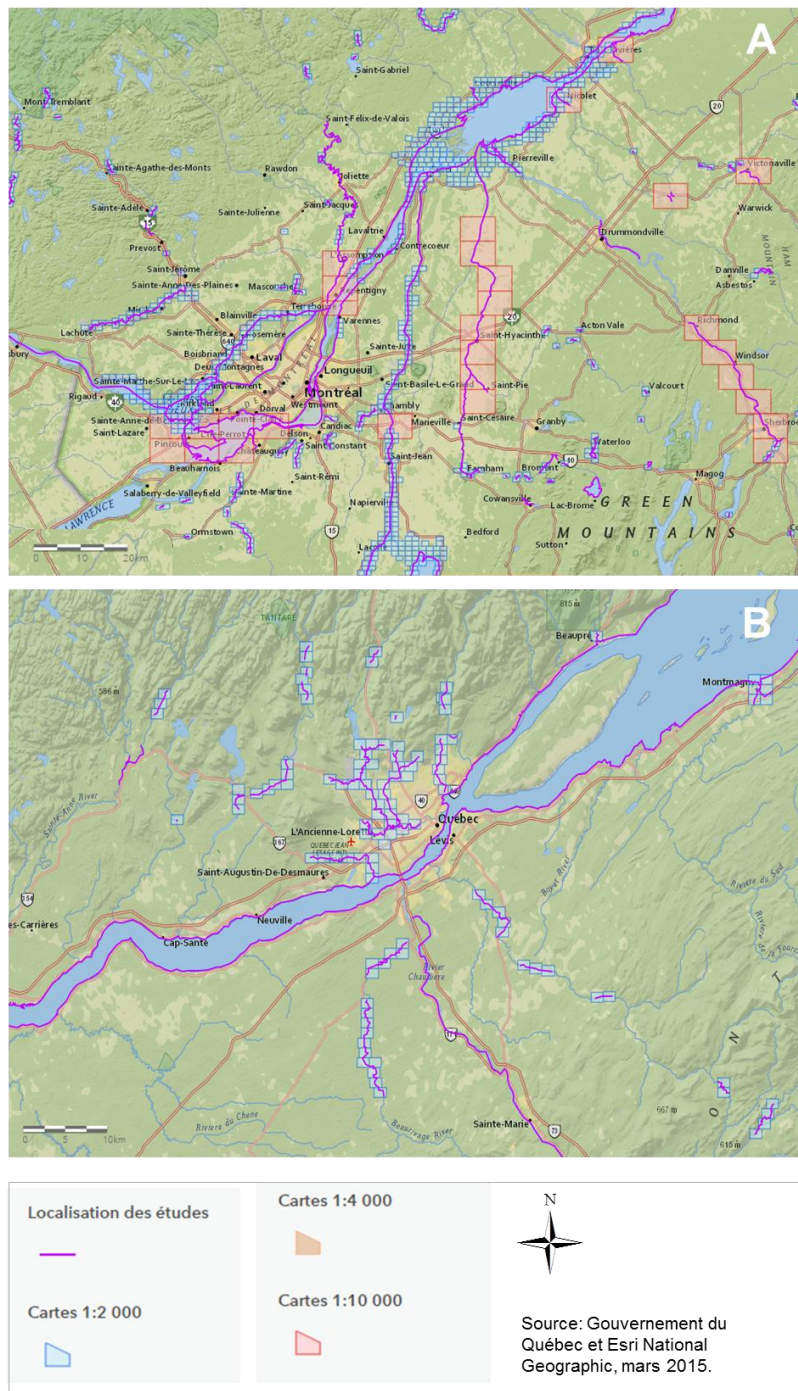


Figure 3.15: Exemple de secteurs de rivière pour lesquels des données de cotes de crues sont disponibles, dans les régions de la ville de Montréal (A) et de Québec (B) (adaptée de Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2015)

3.4.4 Données de validation des étendues des zones urbaines et rurales inondées

Deux images multi-spectrales de très haute résolution spatiale, mises à notre disposition par SPC et par le MSP, ont été utilisées pour valider les cartographies des zones urbaines et rurales inondées. Ces images ont été acquises par les capteurs optiques des satellites IKONOS-2 et GeoEye-1.

Le satellite IKONOS-2 est un satellite commercial lancé en 1999, opérant en mode panchromatique (longueurs d'onde de 0,45 μm à 0,90 μm) et en mode multi-spectral (longueurs d'onde de 0,45 μm à 0,86 μm , du bleu au proche infra-rouge). Il n'est plus en fonction depuis le mois de mars 2015. Ce satellite possédait une orbite héliosynchrone quasi-polaire, d'une altitude de 680 km, et réalisait une orbite par période de 98 min (Digital Globe, 2013). Sa direction de visée pouvait être modifiée, pour permettre l'acquisition d'images à droite et à gauche de la trace de l'orbite. Son temps de revisite sur une même zone variait ainsi de 1 à 3 jours, selon l'angle orbital de visée et la résolution spatiale voulue. Les acquisitions réalisées en mode panchromatique avaient une résolution de 1 m (0,82 m au nadir) et de 4 m en mode multi-spectral (3,2 m au nadir). IKONOS-2 était, au moment de son lancement en 1999, le seul satellite commercial capable d'acquérir des données en mode panchromatique et en mode multi-spectral avec une résolution spatiale aussi précise.

GeoEye-1 est également un satellite commercial, lancé en 2008, et dont les caractéristiques sont proches de celles du capteur IKONOS-2. Il opère en mode panchromatique (longueurs d'onde de 0,45 μm à 0,80 μm) et en mode multi-spectral (longueurs d'onde de 0,45 μm à 0,92 μm , du bleu au proche infra-rouge). Les images acquises en mode panchromatique ont une résolution spatiale nominale de 0,41 m au nadir et une résolution de 1,65 m en mode multi-spectral (Digital Globe, 2014). Ce satellite possède une orbite héliosynchrone quasi-polaire, à 680 km d'altitude, ce qui lui permet de réaliser une orbite par période de 98 min. Le capteur possède la capacité d'imager dans toutes les directions (avant, arrière, et d'un côté et de l'autre de la trace de l'orbite), ce qui lui permet de viser des cibles multiples au cours d'un même passage. La capacité de revisite du satellite sur une même zone est ainsi de 1 à 3 jours, selon l'angle orbital visé.

L'image GeoEye-1 utilisée est une mosaïque d'images GeoEye-1, acquises le 1^{er} mai 2011 à 13h09 heure locale le long de la même orbite, dans un ciel dépourvu de nuages. La mosaïque est formée d'images *pan-sharpened* (diminutif de Panchromatic sharpening), ce qui signifie

qu'une image panchromatique et qu'une image multi-spectrale, acquises simultanément, ont été fusionnées pour créer une image optique de très haute résolution spatiale, à savoir de 0,6 m. Au moment de l'acquisition, le niveau d'eau mesuré à la station de jaugeage était de 27,47 m à la station de jaugeage 02OJ007, et était ainsi identique à celui mesuré à la même station au moment de l'acquisition de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin, quelques heures plus tôt le même jour (à 7h14 heure locale). Il est alors légitime de supposer que les limites de l'inondation sont identiques sur les données GeoEye-1 et RS-2. La mosaïque d'images GeoEye-1 ne couvre cependant qu'une petite partie de la zone inondée imagée par le capteur RS-2 le même jour. Ainsi, la validation de l'étendue des zones d'eau libre puis de l'étendue finale des zones urbaines et rurales inondées n'a été possible que pour une section de 13,5 km de long de la rivière Richelieu, entre 45°21'55.00"N et 45°14'39.00"N. En dépit de sa taille réduite, différents types d'occupation du sol inondés, à savoir des zones urbaines, des zones forestières et boisées, des champs et des zones de végétation, sont présentes dans cette section d'étude.

La seconde image disponible est une mosaïque d'images IKONOS-2, acquise le 8 mai 2011 à 10h56 heure locale, dans un ciel partiellement nuageux (la couverture nuageuse sur la zone couverte par la mosaïque étant de 6%). Cette mosaïque est issue d'images *pan-sharpened*, avec une résolution spatiale de 1 m. Au moment de l'acquisition des images IKONOS-2, les niveaux d'eau mesurés à la station de jaugeage Rapid Fryers étaient de 27,57 m. Les niveaux d'eau mesurés à la même station 27 h plus tôt, au moment de l'acquisition de l'image RS-2 en mode Fin (le 7 mai à 18h59 heure locale), étaient de 27,53 m, ce qui est relativement proche. On suppose donc que l'étendue des zones inondées n'aura pas changée dans ce délai de 27 h entre l'acquisition de l'image RS-2 en mode Fin et celle de l'image IKONOS-2. Enfin, la mosaïque d'images IKONOS-2 couvre l'intégralité de la section de rivière imagée par RS-2 le même jour, ce qui permet de tester et de valider la méthode sur une section de rivière de plus de 29,5 km de long (de 45°23'50,00"N à 45°08'08.00"N), contenant de larges superficies de champs inondés, de zones urbaines inondées et de zones végétales et boisées inondées. Le Tableau 3.7 résume les caractéristiques principales de cette mosaïque d'images IKONOS-2 et de l'image GeoEye-1.

Tableau 3.7: Caractéristiques des images optiques IKONOS-2 et GeoEye-1 de très haute résolution

Image	Date et Heure d'acquisition*	Mode	Résolution Spatiale (m)	Couverture nuageuse (%)	Angle moyen au NADIR (°)
GeoEye-1	1er Mai 2011 10:59	PAN/MS1	0,6	0	5
IKONOS-2	8 Mai 2011 10:56	PAN/MS1	1	6	9

* Heure locale du Québec

3.4.5 Prétraitements et exploitation des images GeoEye-1 et IKONOS-2

a) Corrections atmosphériques et radiométriques

Le signal radiométrique mesuré par les capteurs opérant dans le domaine spectral de l'émission solaire est fortement influencé par les effets de l'atmosphère, et plus précisément par l'absorption et la diffusion exercées par les gaz et les aérosols qu'elle contient (Kergomard, 2000). Le signal peut également être affecté par des irrégularités du capteur, par du bruit diffusé par le capteur. Avant de les exploiter, il convient donc généralement de corriger les images issues des capteurs multi-spectraux de ces effets radiométriques et atmosphériques, et ainsi de transformer les comptes numériques en valeurs physiques de réflectance de surface. Les images GeoEye-1 et IKONOS-2 mises à notre disposition ayant déjà subi ces traitements, l'application de corrections atmosphériques et radiométriques n'a pas été nécessaire. De plus, cette étape n'étant selon Kergomard (2000) pas indispensable pour des images dont l'interprétation et l'analyse se fait uniquement de manière visuelle, comme c'est le cas ici, la précision de ces corrections n'a pas été contrôlée.

b) Correction géométrique

La correction géométrique des images a également été préalablement effectuée par le fournisseur de l'image (DigitalGlobe). Cependant, les images présentaient un décalage notable avec les points de contrôle de données vectorielles du réseau routier de la zone d'étude (données BDTQ au 1 :20 000) utilisé pour la correction géométrique des images RS-2, et ne

permettaient ainsi pas de superposer de manière précise les images *pan-sharpened* et les images RS-2. Il a donc été nécessaire de procéder à une amélioration de la correction géométrique. Pour la mosaïque d'images IKONOS-2, une transformation polynomiale de premier ordre a été appliquée en utilisant des points de contrôle au sol des données vectorielles du réseau routier. Pour la mosaïque d'images GeoEye-1, la transformation polynomiale a été appliquée à partir de points de contrôle pris sur l'orthoimage IKONOS-2 et sur les données vectorielles du réseau routier. Toutes deux ont été géoréférencées dans le système de coordonnées UTM (*Universal Transverse Mercator*), zone 18 Nord, dans le système de référence géodésique NAD83 (*North American Datum de 1983*). La précision de la correction géométrique de chaque image est présentée au Tableau 3.8.

Tableau 3.8: Nombre de points de contrôle et précision de la correction géométrique des mosaïques d'images IKONOS-2 et GeoEye-1 obtenue à l'aide d'une transformation polynomiale

Image	Nombre de points de contrôle	RMS X (pixel)	RMS Y (pixel)	RMS (pixel)
GeoEye-1	15	0,36	0,32	0,49
IKONOS-2	15	0,48	0,27	0,54

c) Délimitation des zones d'eau libre et des zones urbaines et rurales inondées

La production des données permettant de valider la détection des zones inondées en eau libre et la cartographie des zones urbaines et rurales inondées issues de l'application de la méthode présentée aux images RS-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin, a été réalisée en délimitant de manière manuelle l'étendue de ces deux types de zones sur les images IKONOS-2 et GeoEye-1. Pour chaque image, deux types de données ont été ainsi créés : 1) des données d'étendue des zones inondées en eau libre; 2) des données d'étendue de l'ensemble des zones urbaines et rurales inondées. A titre d'exemple, la Figure 3.16 présente les données générées à partir de l'image GeoEye-1.

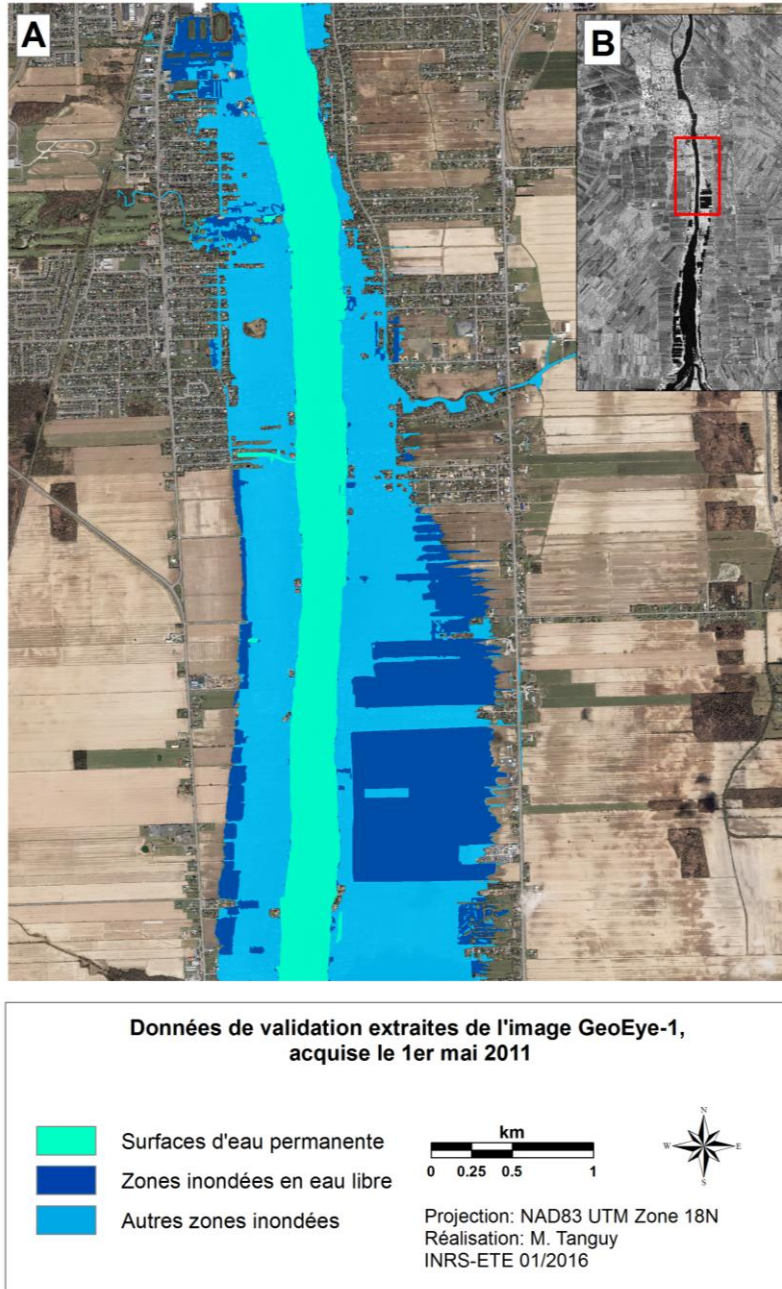


Figure 3.16: Exemple de données de validation extraites de l'image GeoEye-1 acquise le 1er mai 2011, pour la zone sud de la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu (A) et localisation de cette zone (B)

La très haute résolution spatiale des images *pan-sharpened* disponibles, la structure linéaire de la zone d'étude et la faible présence de nuages au-dessus des zones inondées ont rendu relativement aisées la photo interprétation et la délimitation manuelle des zones inondées en eau libre. Dans certains champs inondés, la présence de sols non inondés mais saturés d'eau a

cependant rendu localement délicate la détection précise de la limite de la zone inondée et sa délimitation. Le panneau A de la Figure 3.17 illustre ce problème : si on aperçoit un léger changement de couleur du sol, laissant supposer qu'on se trouve à la limite de la zone inondée, il est difficile de détecter précisément cette limite.



Figure 3.17: Exemples de zones au niveau desquelles la délimitation manuelle des zones inondées a été difficile. A : Extrémités des champs inondés; B : Zones résidentielles inondées; C : Arbres et arbustes inondés

De la même manière, la délimitation manuelle de l'étendue des zones inondées a été localement complexe dans les zones occupées par des bosquets d'arbres ou d'arbustes et par de la végétation basse (panneau B, Figure 3.17). Le feuillage étant déjà développé au moment de l'acquisition des images, établir visuellement la limite de l'inondation sous les arbres et les arbustes a été parfois difficile. Dans certaines zones résidentielles inondées, la présence d'un bâti dense, entouré d'arbres, a également complexifié la détection visuelle des zones inondées et ainsi leur délimitation (panneau B, Figure 3.17). Afin de délimiter au mieux l'inondation dans ces différentes zones, nous avons tenu compte de leur contexte spatial, et en particulier de la présence ou de l'absence d'eau dans leurs alentours directs, de leur localisation à l'intérieur ou non de la plaine inondable de récurrence 100 ans, mais aussi de leurs caractéristiques topographiques. Malgré ces efforts, des erreurs locales d'estimation de l'étendue des zones inondées peuvent subsister dans les différents jeux de données de validation.

3.4.6 Données de validation des hauteurs d'eau dans les zones inondées

Malgré la longue durée de l'inondation de la rivière Richelieu au printemps 2011, aucun relevé de hauteurs d'eau n'a été réalisé dans les zones inondées. Il ne nous a également pas été possible d'avoir accès aux réclamations d'assurance des habitants dont la résidence a été inondée, vraisemblablement pour des raisons de confidentialité. Les seules informations pouvant être mises à notre disposition sont issues de rapports d'inspection réalisés entre la mi-mai et la mi-juin 2011 dans les propriétés inondées, mais qui ne font état que de l'importance des dommages. Aucune information sur la hauteur d'eau au niveau ou dans les bâtiments n'y est présente. Il aurait enfin été possible d'aller sur place rencontrer les propriétaires des bâtiments inondés, afin que ceux-ci nous indiquent jusqu'où l'eau est montée. Cependant, il était selon nous difficile pour les propriétaires d'indiquer avec précision les hauteurs d'eau au niveau de leur résidence aux dates des 1^{er} et 7 mai 2011, alors que l'inondation avait déjà eu lieu depuis 5 ans au moment où la question de l'estimation des hauteurs d'eau a été abordée dans ce projet, et que des travaux parfois importants avaient déjà été réalisés sur les bâtiments. Une méthode alternative a donc dû être mise à profit pour estimer les hauteurs d'eau dans les zones inondées.

Une mosaïque d'orthophotographies aériennes acquises le 30 avril 2011 a été mise à notre disposition par la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu au mois de mars 2016, dans le cadre du projet GARI. Ces orthophotographies ont une résolution spatiale de 0,1 m, ce qui permet de localiser très précisément les zones inondées ainsi que leurs limites. Le fait que cette image ait

été acquise le 30 avril, soit un jour avant l'acquisition de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin utilisée pour tester la méthode de cartographie des zones inondées, n'est pas une limite importante. Le niveau d'eau mesuré à la station 02OJ007 (Rapides Fryers) était en effet de 27,45 m le 30 avril et de 27,48 m le 1^{er} mai, au moment de l'acquisition des images. Cette différence de 3 cm est inférieure à la précision que nous pourrions obtenir avec l'orthophotographie. Les limites des zones inondées sont également presque identiques. Il est à noter qu'il aurait été également possible de simuler les hauteurs d'eau dans les zones inondées à partir de l'image GeoEye-1 acquise le 1^{er} mai. Cependant, la résolution spatiale de cette image (0,6 m) ne permet pas d'obtenir une délimitation des zones inondées aussi précise qu'avec la mosaïque d'orthophotographies. Afin de limiter les erreurs d'estimation des hauteurs d'eau, cette mosaïque lui a donc été préférée.

Les élévations des hauteurs dans les zones inondées ont donc été simulées à partir de cette mosaïque d'orthophotographies et du MNT disponible, à l'aide de la méthode présentée dans la section 3.2.

L'étendue des zones inondées et les hauteurs d'eau n'étant pas les mêmes le 1^{er} mai et le 7 mai 2011, les données de hauteur d'eau générées à partir de l'orthophotographie acquise le 30 avril n'ont pu être utilisées pour valider les hauteurs d'eau extraites de la carte des zones inondées obtenue à l'aide des données RS-2 en mode Fin. La mosaïque d'images IKONOS-2 ne permettant pas une délimitation très précise des zones inondées, il a été décidé de n'utiliser que le cas d'étude du 1^{er} mai pour tester la méthode d'estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées. Ce seul cas d'étude devrait cependant permettre de discuter de la validité de la méthode développée.

Cette délimitation manuelle des zones inondées n'a pu être réalisée sur l'ensemble de la mosaïque d'orthophotographies, et cela pour des questions de temps. Délimiter manuellement les zones inondées est en effet un travail fastidieux et long de plusieurs jours. Cette délimitation s'est donc concentrée sur une zone urbaine située légèrement en amont du centre-ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Cette zone a été sélectionnée car elle est celle qui a été la plus durement touchée par l'inondation de 2011 dans la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu. Les eaux ont envahi par endroit des surfaces distantes de plus de 500 m des berges de la rivière, inondant ainsi des dizaines de bâtiments et forçant l'évacuation d'une partie des résidents. Les données de hauteur d'eau générées pour cette zone, et qui serviront de données de validation, sont présentées dans la Figure 3.18.

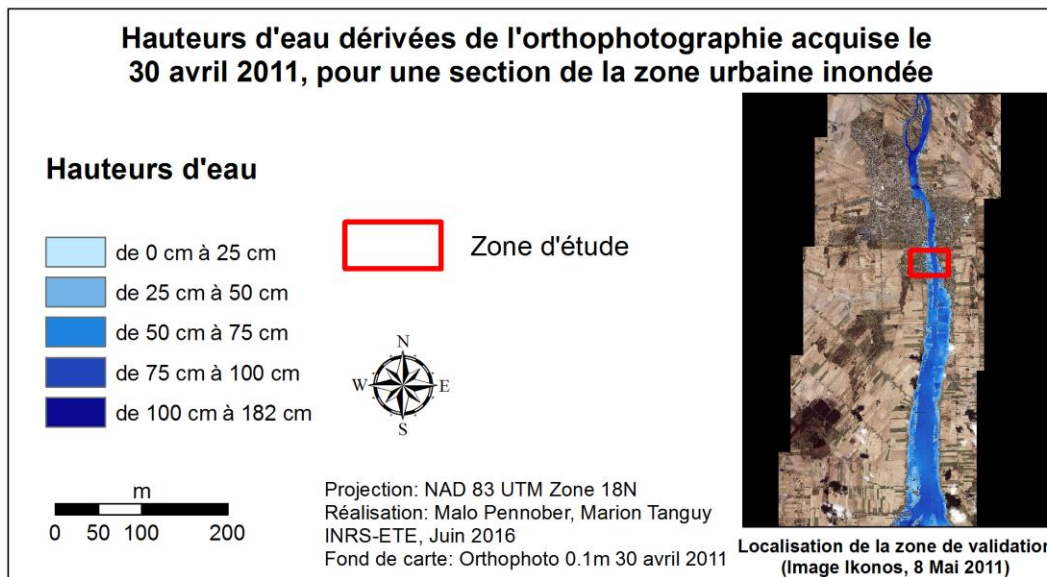
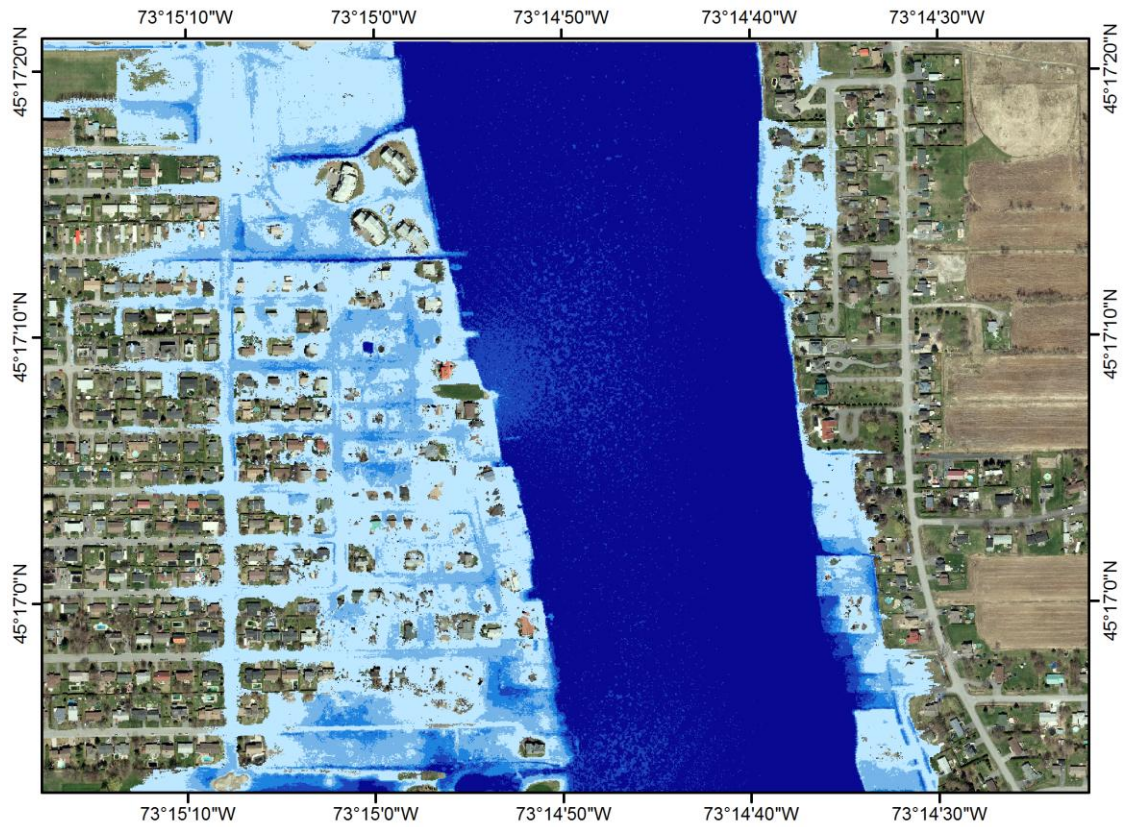


Figure 3.18: Carte des hauteurs d'eau de validation pour une partie de la zone urbaine inondée.

3.5 Sommaire

Ce troisième chapitre a tout d'abord permis de présenter une approche originale de cartographie des zones urbaines et rurales inondées. Celle-ci combine l'imagerie RSO de très haute résolution spatiale acquise en bande C et en polarisation HH, et des données à caractère hydraulique, à savoir des données d'intervalle de récurrence d'inondation estimées en tout point de la zone d'étude. Une méthode permettant d'obtenir une estimation de ces intervalles de récurrence d'inondation à partir de données topographiques de très haute résolution spatiale et des limites des plaines inondables de différentes récurrences disponibles pour la rivière a été proposée. Les différentes étapes de l'approche de cartographie des zones urbaines et rurales inondées ont par la suite été détaillées. Enfin, une méthode d'estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées, mettant à profit la cartographie des zones inondées issue sur l'image RSO et des données topographiques de très haute précision, a été définie.

La zone sur laquelle ces méthodes ont été testées est la rivière Richelieu, qui s'écoule au sud-est du Québec. Cette rivière a connu d'importantes inondations du mois d'avril à la fin du mois de juin 2011, ce qui a permis l'acquisition de deux images RS-2 en mode Fin et en mode Ultra-Fin adaptées au test et à la validation de l'approche de cartographie proposée. L'acquisition quasi-simultanée d'images optiques de très haute résolution spatiale IKONOS-2 et GeoEye-1 a permis de fournir des données de validation des cartographies des zones inondées obtenues. L'ensemble des prétraitements nécessaires à l'utilisation de ces images RSO et des images optiques a été détaillé. Les données topographiques de très haute résolution spatiale ainsi que les limites des plaines inondables de différentes récurrences disponibles pour la rivière Richelieu, et nécessaires à l'estimation des intervalles de récurrence en tout point de la zone d'étude, ont également été présentées. La manière dont ces données ont été produites a été présentée, puis leur disponibilité à l'échelle du Québec, mais aussi d'autres pays, a été discutée. C'est en effet un point important à considérer en vue de l'application de la méthode proposée à d'autres scénarios d'inondation. Enfin, les données de validation des hauteurs d'eau dans la zone inondée, basées sur une orthophotographie d'une résolution de 0,1 m, ont été présentées.

4. RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION SPATIALE DE L'ALÉA INONDATION

Ce quatrième chapitre présente les résultats des méthodes de caractérisation spatiale de l'aléa inondation, suite à leur application à un scénario d'inondation réel. Ces résultats sont présentés en trois étapes. Les résultats de la classification orientée-objets des zones inondées en eau libre sont tout d'abord détaillés et leur précision est discutée (4.1). Il est ensuite fait état de la précision de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées (4.2), puis des avantages mais aussi des limites de la méthode proposée (4.3). Puis, ce chapitre expose et discute les résultats de l'estimation des hauteurs d'eau en zone inondée (4.4). Enfin, le potentiel d'utilisation de ces méthodes en mode opérationnel est discuté (4.5). Ce chapitre s'achève avec un sommaire, qui rappelle les principales remarques et leçons issues de l'application des méthodes proposées à un scénario d'inondation réel (4.6).

4.1 Classification orientée-objets des zones inondées en eau libre

Les résultats de la détection des zones inondées en eau libre sont présentés en trois étapes. La précision de la classification orientée-objets dite « initiale » des zones d'eau libre est tout d'abord abordée. Les résultats du raffinement de la classification sont ensuite présentés et analysés. Ces deux étapes permettront de mettre en relief l'intérêt de l'exploitation de la logique floue et des intervalles de récurrence d'inondation pour la réduction des erreurs de classification des zones d'eau libre. Elles permettront également, au cours de la dernière partie de cette section, de discuter de la pertinence de la position des seuils σ_1^0 et σ_2^0 pour la classification des zones inondées en eau libre.

4.1.1 Classification initiale des zones d'eau libre

La première étape de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées vise à détecter l'eau libre sur les images RSO d'inondation par l'intermédiaire d'une approche de classification orientée-objets. Cette approche implique tout d'abord une segmentation multi-résolution de l'image RSO d'inondation, puis l'ajustement de la FDP de type Gamma des

valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets d'eau libre et enfin la classification par logique floue de ces objets, à l'aide de seuils extraits de cette FDP.

La Figure 4.1 présente les FDP ajustées aux histogrammes des valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets des images RS-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin de l'inondation de la rivière Richelieu sélectionnées pour tester l'approche proposée. La position des seuils σ_1^0 et σ_2^0 obtenus suite à l'ajustement de ces FDP et utilisés pour la classification par logique floue des objets de l'image est indiquée sur chaque figure.

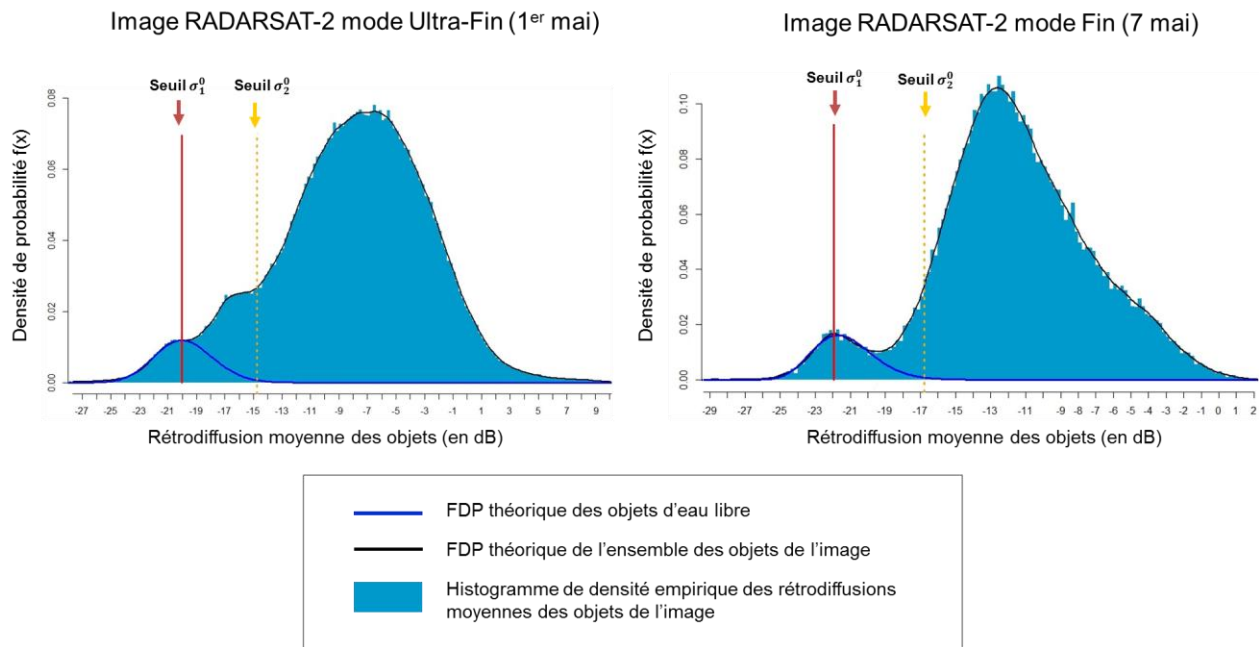


Figure 4.1: FDP Gamma des rétrodiffusions moyennes des objets d'eau libre des images RS-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin

Le Tableau 4.1 rapporte les valeurs estimées des paramètres optimisés de ces deux FDP et du seuil σ_2^0 . L'erreur standard des paramètres optimisés, qui permet d'estimer la précision de l'ajustement de la distribution théorique par rapport à la distribution empirique, est également renseignée.

Tableau 4.1: Valeurs estimées et erreur standard des paramètres des FDP Gamma et du seuil σ_2^0 pour les images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin

Paramètres de la FDP	RADARSAT-2 mode Ultra-Fin		RADARSAT-2 mode Fin	
	Valeur estimée	Erreur standard	Valeur estimée	Erreur Standard
σ_1^0	-20,03 dB	0,057	-21,70 dB	0,012
k	0,010	0,008	0,048	0,007
σ_2^0	-14,76 dB	-	-16,76 dB	-

Les résultats de la classification initiale de l'eau libre sur les images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin ont été comparés aux données de référence générées à partir des images GeoEye-1 et IKONOS-2. Les résultats de cette évaluation quantitative sont présentés dans le Tableau 4.2. Ils sont exprimés en pourcentage des pixels identifiés comme de l'eau libre sur les données de validation. Deux tableaux, en Annexe II (Tableau A2.1 et Tableau A2.2), présentent ces résultats exprimés en nombre de pixels pour les deux images analysées. Pour permettre une analyse qualitative de la précision de la classification initiale de l'eau libre, ces résultats sont présentés sous forme de cartes de contingence à la Figure 4.2.

Tableau 4.2: Précision de la classification initiale des surfaces d'eau libre

Image RS-2	Correctement classifiés (%)*	Erreurs d'omission (%)*	Erreurs de commission (%)*
Mode Ultra-Fin	65	35	30
Mode Fin	88	12	10

(%) des pixels identifiés comme « eau libre » sur les données de validation

Le terme « erreurs d'omission » désigne les pixels correspondant à de l'eau libre sur les données de validation, mais qui n'ont pas été inclus dans la classe Eau libre à l'issue de la classification. Le terme « erreurs de commission » désigne les pixels ne correspondant pas à de

l'eau libre sur les données de validation, mais qui ont été intégrés dans la classe Eau libre. La distinction entre les zones inondées en eau libre et les zones d'eau permanentes (rivière, lacs, etc.) n'est pas faite. Les résultats présentés englobent ainsi ces deux types de surface.

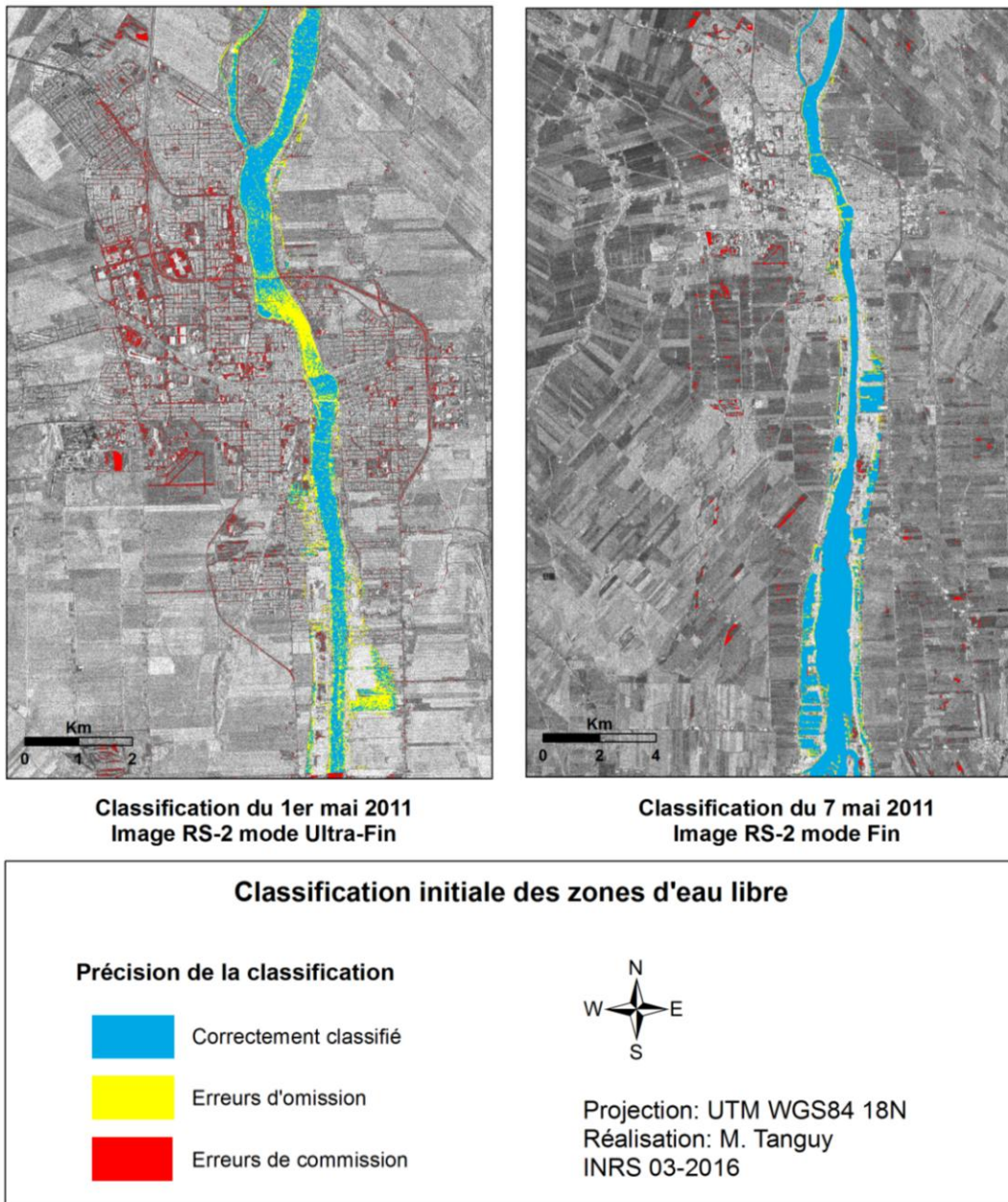


Figure 4.2: Résultats cartographiques de la classification initiale des zones d'eau libre pour les images RS-2 du 1^{er} et du 7 mai 2011

Les résultats présentés au Tableau 4.2 permettent de souligner les résultats satisfaisants obtenus sur l'image RS-2 en mode Fin à l'aide des seuils σ_1^0 et σ_2^0 . En effet, 88% des pixels d'eau libre ont été correctement identifiés sur cette image, avec un taux d'erreurs de commission de 10%. Les résultats sont cependant moins bons sur l'image RS-2 en mode Ultra-Fin puisque seules 65% des zones d'eau libre ont été correctement classifiées. Les erreurs de commission associées à cette classification sont de 30%, ce qui est particulièrement élevé.

a) Analyse des sources d'erreurs d'omission

Le taux élevé d'erreurs d'omissions sur l'image en mode Ultra-Fin (35%) s'explique en très grande partie par la présence de vagues et de vaguelettes sur les surfaces d'eau libre, comme on peut le voir sur la Figure 4.3. Ces vagues sont dues à l'action du vent, mais également à la présence d'un barrage au niveau du centre-ville de Saint-Jean-sur-Richelieu (le barrage du Canal-de-Saint-Ours), qui crée des turbulences à la surface de l'eau sur une longueur de plus d'un kilomètre. Les surfaces d'eau affectées ayant une rugosité plus élevée, la réflexion spéculaire ne domine plus et est remplacée par une réflexion diffuse : les valeurs de rétrodiffusion de la surface d'eau augmentent. L'hétérogénéité des objets devant être minimisée au cours du processus de segmentation, les surfaces d'eau libre ayant de plus fortes valeurs de rétrodiffusion que le reste de l'eau libre se retrouvent isolées à l'intérieur d'objets spécifiques. Ces objets ont ainsi une rétrodiffusion moyenne nettement plus élevée que celle des autres objets d'eau libre.

Sur l'image en mode Ultra-Fin, la différence de rétrodiffusion moyenne entre ces deux types d'objets d'eau libre varie ainsi de 1 dB à 10 dB, selon les objets. Ce phénomène crée un chevauchement marqué des valeurs de rétrodiffusion moyennes des objets d'eau libre et des objets représentant le reste de l'occupation du sol dans l'histogramme des valeurs de rétrodiffusion moyennes des objets de l'image. Ce chevauchement est particulièrement évident sur l'histogramme empirique des valeurs de rétrodiffusion de l'image en mode Ultra-Fin, présenté dans la Figure 4.1. Différencier de manière précise l'ensemble des surfaces d'eau libre du reste de l'occupation du sol à l'aide d'un seuil unique est alors impossible. Ainsi, si une valeur plus élevée du seuil σ_2^0 aurait permis de réduire en partie les erreurs d'omission, cela aurait également entraîné une augmentation des erreurs de commission.

Enfin, sur l'image en mode Fin, les impacts de la présence de vent et de celle du barrage sont moindres, et cela grâce au plus fort angle d'incidence de l'image (48°) et à sa plus faible résolution spatiale (8 m). Seules de petites surfaces d'eau en aval du barrage ont été ainsi omises de la classification (Figure 4.3).

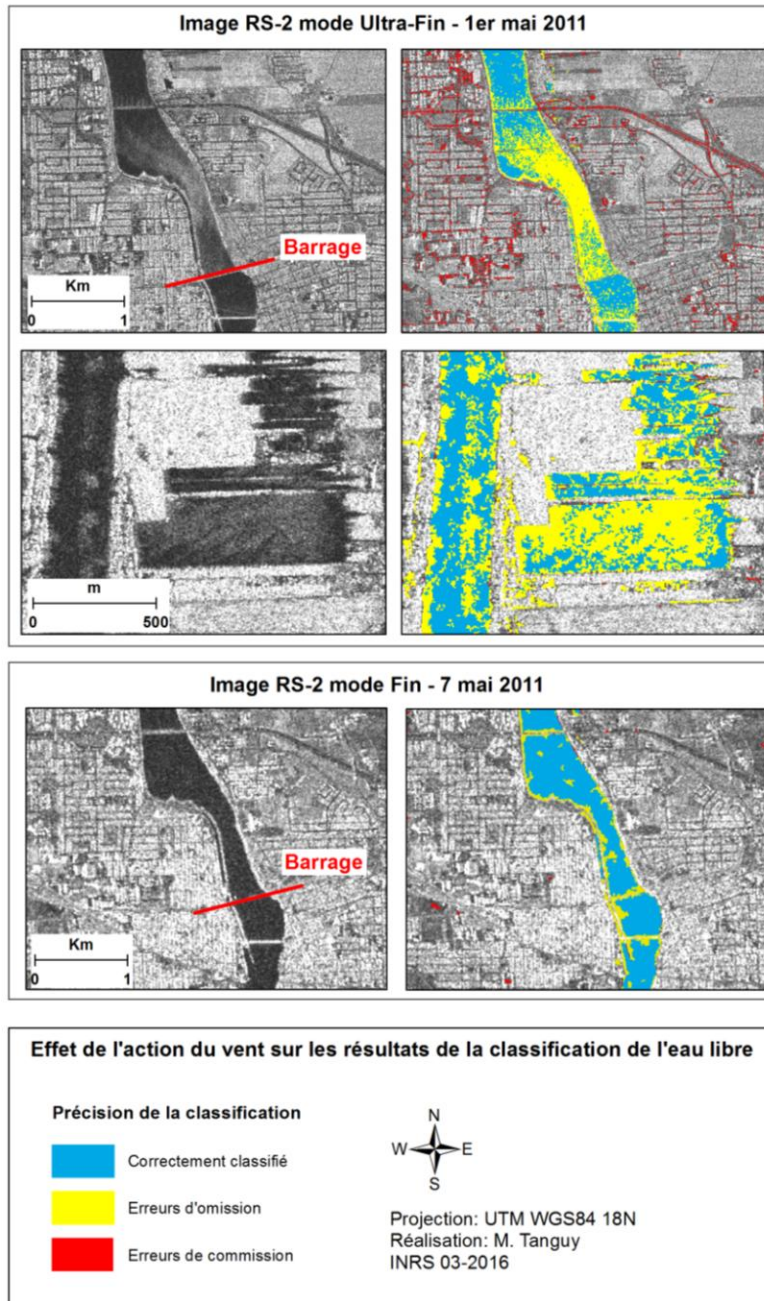


Figure 4.3: Cartographie des erreurs d'omission (en jaune) des plans d'eau libre dues à la présence de vagues à leur surface

La présence de végétation en bordure des champs inondés et le long des berges de la rivière est également une source importante d'erreurs de commission. Comme expliqué dans la section 2.2.3, la double réflexion qui se produit entre la surface de l'eau et les différentes strates de la végétation génère une augmentation des valeurs de rétrodiffusion, et ainsi des pixels aux tons plus clairs que ceux de l'eau libre sur les images radar. Ce phénomène a deux conséquences sur les résultats du processus de segmentation orientée-objets.

Dans certains cas, ces pixels vont être intégrés à des objets adjacents formés de pixels ayant des rétrodiffusions plus élevées que celles de l'eau libre, tels que les objets représentant les zones de végétation dense ou les zones boisées qui sont présentes aux extrémités de nombreux champs (Figure 4.4).

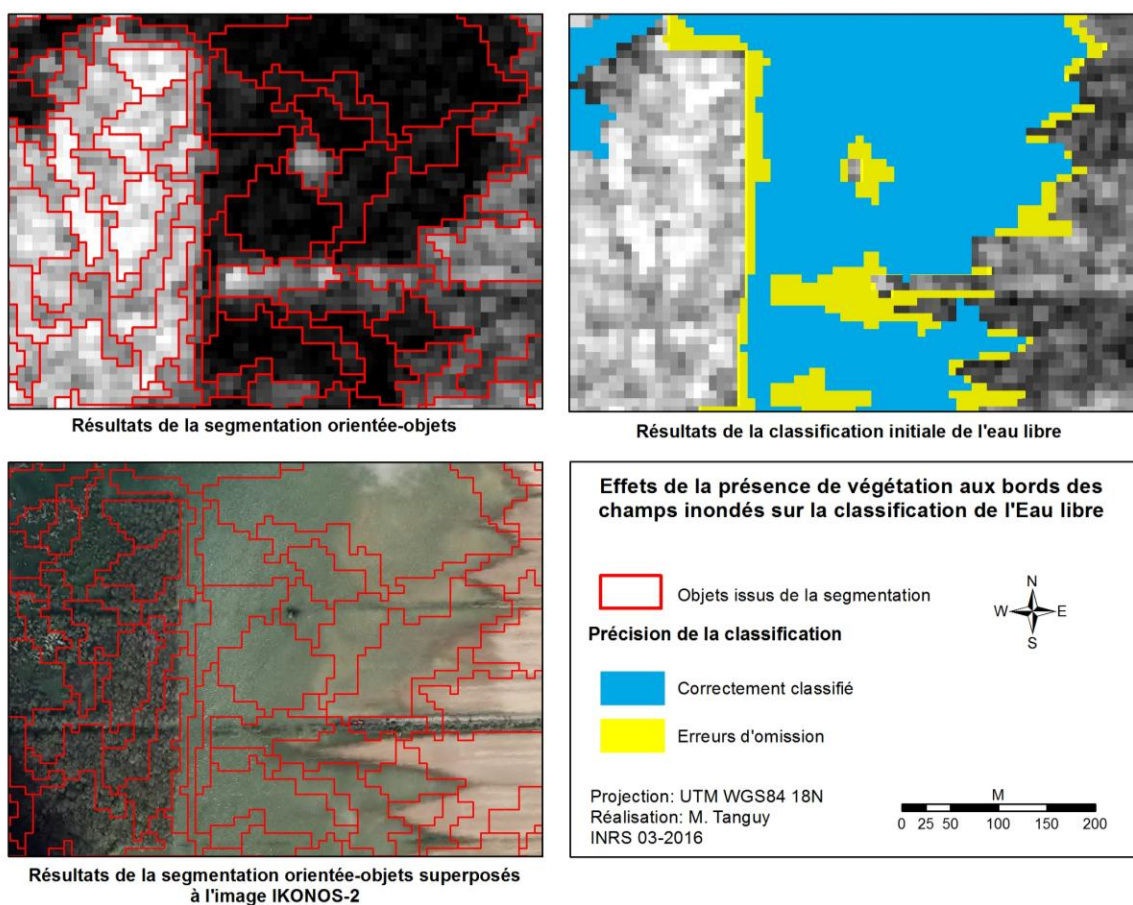


Figure 4.4: Effet du phénomène de double rebond à l'interface eau libre-végétation sur les résultats de la classification orientée-objets

Dans d'autres cas, particulièrement nombreux, ces pixels vont être regroupés en objets contenant des pixels mixtes, dont les valeurs de rétrodiffusion en dB pourraient être qualifiées d'intermédiaires puisqu'elles sont comprises entre les valeurs de rétrodiffusion de l'eau libre et celles du reste de l'occupation du sol. Ces objets ayant des rétrodiffusions moyennes plus élevées de quelques dB que ceux représentant de l'eau libre, ils ne sont pas intégrés à la classe Eau libre. Ce phénomène de double rebond à l'interface eau libre-végétation a été identifié par de nombreux auteurs comme une des sources importantes de sous-estimation de l'étendue des zones inondées dans les zones rurales (Hess *et al.*, 1990, Horritt *et al.*, 2003, Mason *et al.*, 2009).

La formation d'objets contenant des pixels aux valeurs « intermédiaires » en bordure des champs inondés ne dépend pas des valeurs données aux différents critères composant le critère d'homogénéité de la méthode de segmentation multi-résolution. Quelles que soient les valeurs attribuées à ces critères, la formation de ces objets a lieu, afin de limiter l'hétérogénéité des objets adjacents représentant de l'eau libre. Leur forme générale ne varie, de plus, que très peu : seules des segmentations internes peuvent apparaître dans ces objets, selon les poids attribués aux critères de forme et de compacité.

Cependant, certains de ces objets formés aux extrémités des champs inondés, et au niveau desquels les erreurs d'omission sont localisées, contiennent des pixels dont les valeurs de rétrodiffusion sont très proches de celles des pixels d'eau libre. Pour les images RS-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin utilisées pour tester la méthode, on considère que les valeurs de rétrodiffusion des pixels d'eau libre sont comprises entre -24 dB et -15 dB. Ces valeurs sont en accord avec celles identifiées dans les travaux de Manjusree *et al.* (2012) et de Matgen *et al.* (2011), pour des zones inondées en eau libre imagées en bande C et en polarisation HH. Pour les deux cas étudiés, les valeurs de rétrodiffusion moyennes des objets contenant des erreurs d'omission, ainsi que les valeurs de rétrodiffusion des pixels formants ces objets, ont été extraites. Leur analyse a montré que de nombreux pixels ayant des valeurs de rétrodiffusion comprises entre -24 dB et -15 dB sont présents dans ces objets et ont ainsi été exclus de la classe Eau libre (Figure 4.5). Ainsi, si l'approche de segmentation orientée-objets permet de limiter la présence de pixels isolés dans la classe Eau libre, elle a aussi pour effet d'exclure certains pixels d'eau libre de la classification. Ces imperfections n'ont cependant qu'un impact limité sur les résultats de la classification. Elles ne sont la source que de 4% et de 0,4% des

erreurs d'omission sur les images en mode Ultra-Fin et en mode Fin, respectivement, ce que nous avons considéré comme négligeable.

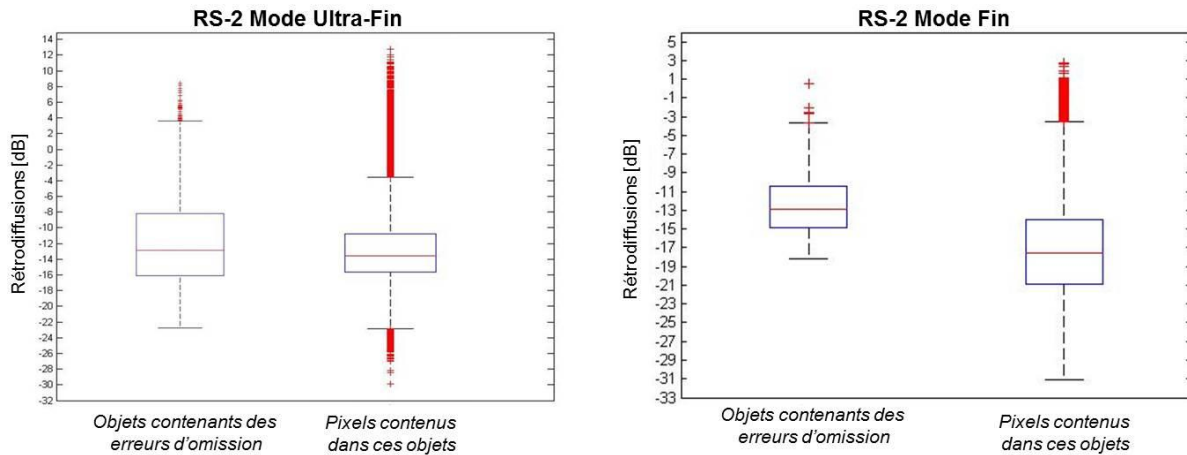


Figure 4.5: Analyse des valeurs de rétrodiffusion moyennes des objets contenant des erreurs d'omission et des valeurs de rétrodiffusion des pixels formant ces objets

La présence d'erreurs d'omission a été notée sur une largeur de deux à trois pixels aux extrémités de certains champs inondés, à la limite de la ligne d'eau (Figure 4.6). Les sols étant nus au moment de l'inondation, la présence de végétation à l'extrémité de ces champs ne peut être la source de ces erreurs. A l'inverse, la différence de résolution spatiale entre les données RS-2 et les images optiques de très haute résolution spatiale utilisées pour générer les données de validation peut en partie expliquer ces erreurs. La résolution spatiale des données RS-2 utilisées, et en particulier celle de l'image en mode Fin, ne permet en effet pas de détecter avec autant de précision la limite de l'eau dans les champs qu'avec les images GeoEye-1 et IKONOS-2. Les pixels présentant la zone de contact entre l'eau et les sols nus sont souvent des pixels mixtes aux valeurs intermédiaires, qui intègrent les faibles rétrodiffusions de l'eau libre et les rétrodiffusions plus élevées des sols nus (O'Grady *et al.*, 2013). Si les sols non inondés sont majoritaires à l'intérieur d'une cellule de résolution, leur plus forte rétrodiffusion prévaudra. Dans les deux cas, ces pixels sont exclus des objets représentant de l'eau libre, causant ainsi une sous-estimation de l'étendue de la zone inondée. Enfin, on a déjà souligné que dans ces zones de contact entre l'eau libre et les sols non inondés, la limite entre les sols humides et les sols inondés a parfois été difficile à positionner manuellement. Il est donc probable que des sols humides, qui ont des valeurs de rétrodiffusion plus élevées que celles de l'eau libre à cause

d'une diffusion de surface de l'onde radar incidente, aient été inclus à certains endroits dans les données de validation de l'étendue des zones d'eau libre.

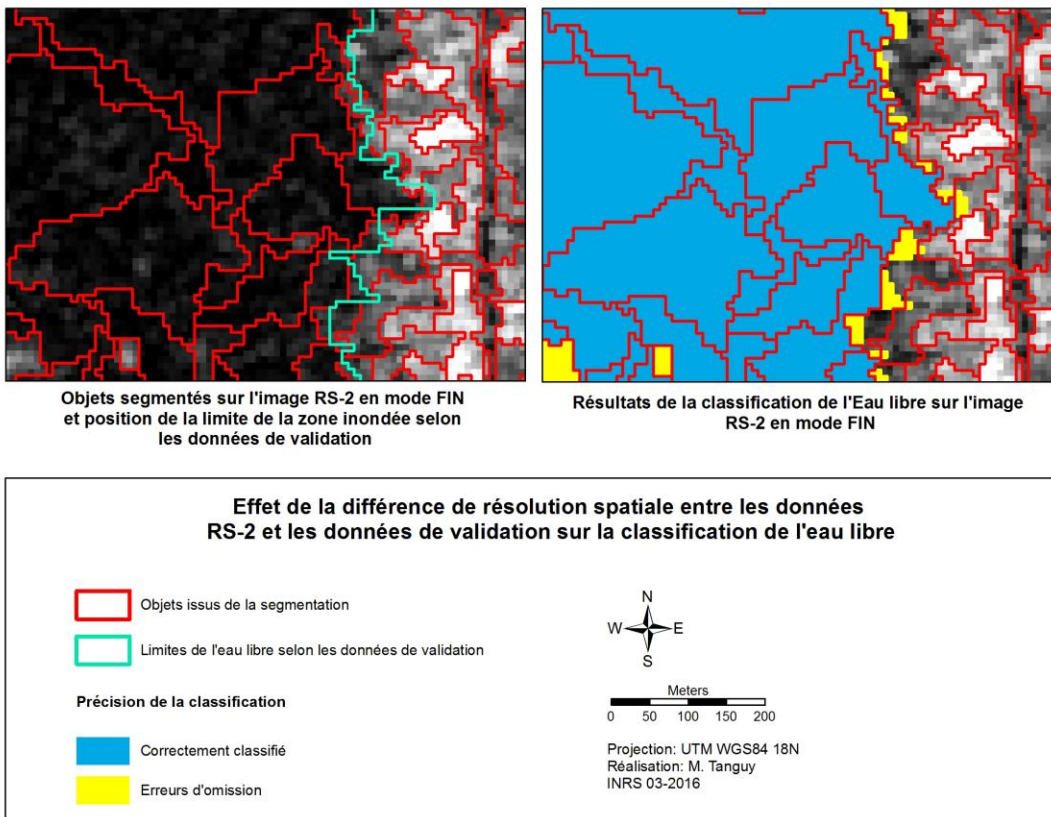


Figure 4.6: Effet de la différence de résolution spatiale entre les données RS-2 et les données de validation sur les résultats de la classification aux extrémités des champs inondés

b) Analyse des sources d'erreurs de commission

Les erreurs de commission liées à la classification des objets d'eau libre ne sont pas localisées sur les mêmes types de surfaces sur l'image en mode Ultra-Fin et sur l'image en mode Fin, comme on peut le voir sur la Figure 4.2. Sur l'image en mode Ultra-Fin, ces erreurs se retrouvent majoritairement en milieu urbain, au niveau de surfaces artificielles ayant une rétrodiffusion de type spéculaire, à savoir des stationnements, des ombres produites par certains bâtiments et des routes larges orientées de manière perpendiculaire à la direction de visée du capteur (Figure 4.7). Il s'agit donc là des erreurs de détection de l'eau libre les plus fréquentes en milieu urbain lorsque de l'imagerie RSO de très haute résolution spatiale est

exploitée (Giustarini *et al.*, 2013; Mason *et al.*, 2012a). Ce type d'erreur est également présent à quelques endroits sur l'image en mode Fin. La résolution spatiale de cette image étant moins fine, les surfaces de petite dimension ayant une rétrodiffusion spéculaire ne sont pas isolées dans des objets spécifiques, mais sont intégrées dans des objets adjacents composés de pixels ayant une plus grande diversité de valeurs de rétrodiffusion. Pour cette image, les erreurs de commission se situent ainsi avant tout sur les surfaces asphaltées de grande dimension et sur de larges zones d'ombre créées par des bâtiments. Cependant, et comme le montre la Figure 4.7, les erreurs de commission sont beaucoup plus importantes en milieu rural, au niveau de champs dépourvus de végétation.

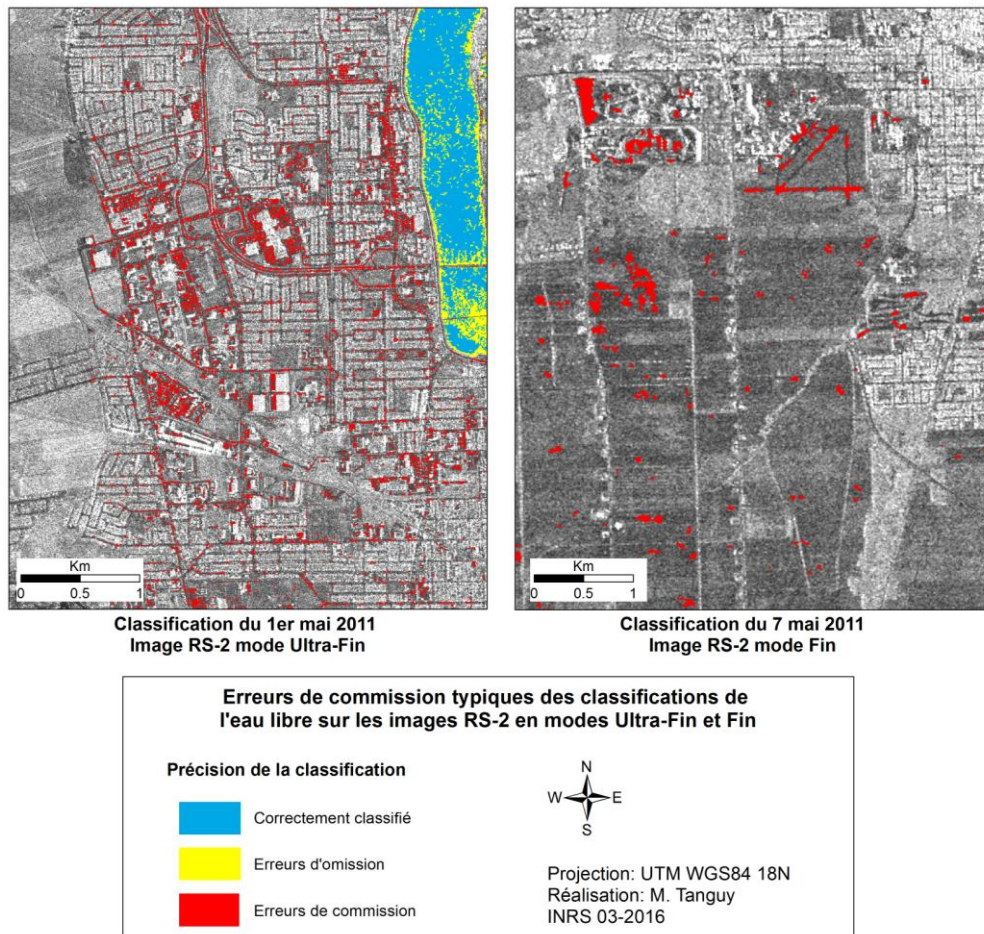


Figure 4.7: Cartographie des erreurs de commission typiques des classifications de l'eau libre sur les images RS-2 en modes Ultra-Fin et Fin

Une analyse visuelle de l'image IKONOS-2 a permis de révéler que ces erreurs de commission sont présentes sur les zones les plus lisses des parcelles agricoles, qui n'étaient pas encore labourées et ensemencées au moment de l'acquisition des différentes images utilisées dans cette étude (Figure 4.8). La rugosité de ces surfaces étant peu élevée, une rétrodiffusion de type spéculaire peut dominer. Cela explique les faibles valeurs de rétrodiffusion de ces surfaces et ainsi la formation d'objets ayant des valeurs de rétrodiffusion moyenne faibles, et proches de celle des objets d'Eau libre. Sur l'image en mode Fin, les erreurs de commission correspondent ainsi parfois à des objets ayant des valeurs de rétrodiffusion moyennes pouvant aller jusqu'à -19,5 dB. Ce phénomène n'est pas présent sur l'image en RS-2 en mode Ultra-Fin, qui a été acquise avec un angle d'incidence moyen de 23°. Cela s'explique par le fait qu'à de plus faibles angles d'incidence et en polarisation HH, le signal radar est moins sensible à la rugosité du sol qu'à de forts angles d'incidence (Baghdadi *et al.*, 2006; Baghdadi *et al.*, 2002; Srivastava *et al.*, 2003; Ulaby *et al.*, 1986b). La dynamique des valeurs de rétrodiffusion des sols nus est donc moindre, et ces valeurs restent élevées. Sur l'image RS-2 en mode Ultra-Fin, les objets représentant des sols nus ont ainsi des valeurs moyennes de rétrodiffusion situées globalement entre -4 dB et -9 dB.

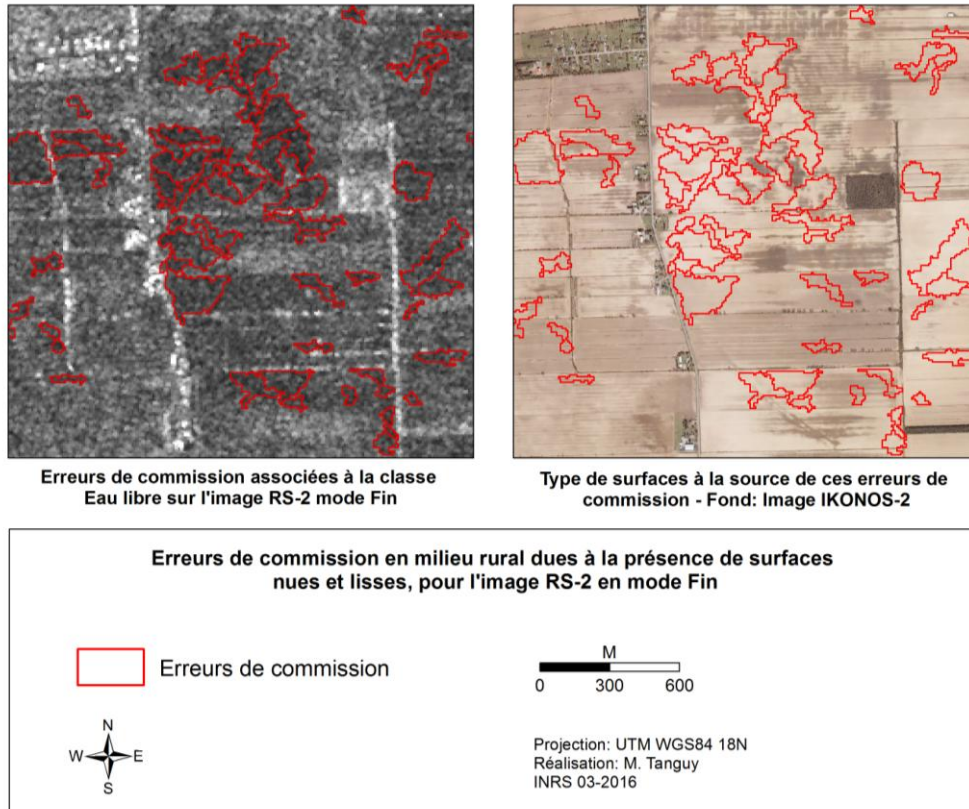


Figure 4.8: Illustration des erreurs de commission en milieu rural dues à des surfaces nues et lisses

Quelques erreurs de commission au milieu de zones humides marécageuses situées à proximité de la rivière, ainsi qu'aux extrémités de certains champs inondés ont été identifiées (Figure 4.9). Ces deux types d'erreurs de commission sont très peu nombreux. Ils sont en grande partie le résultat d'imprécisions dans les données de validation dérivées des images GeoEye-1 et IKONOS-2. La délimitation manuelle des surfaces d'eau libre étant en effet délicate dans les zones humides, du fait de leurs limites irrégulières et de la présence de petits éléments de végétation émergents (cela est particulièrement évident sur le panneau A de la Figure 4.9), il a été décidé de ne pas les intégrer aux données de validation. Un problème identique s'est posé aux extrémités des champs inondés, où distinguer précisément les zones inondées des sols non inondés mais saturés d'eau a été parfois difficile. Ces erreurs de commission sont dues au fait que des pixels représentant des sols saturés d'eau mais non inondés, et ayant ainsi des valeurs de rétrodiffusion très faibles (Bruckler *et al.*, 1988; Chanzy 1993), ont été intégrés à des objets contenant une majorité de pixels d'eau libre.

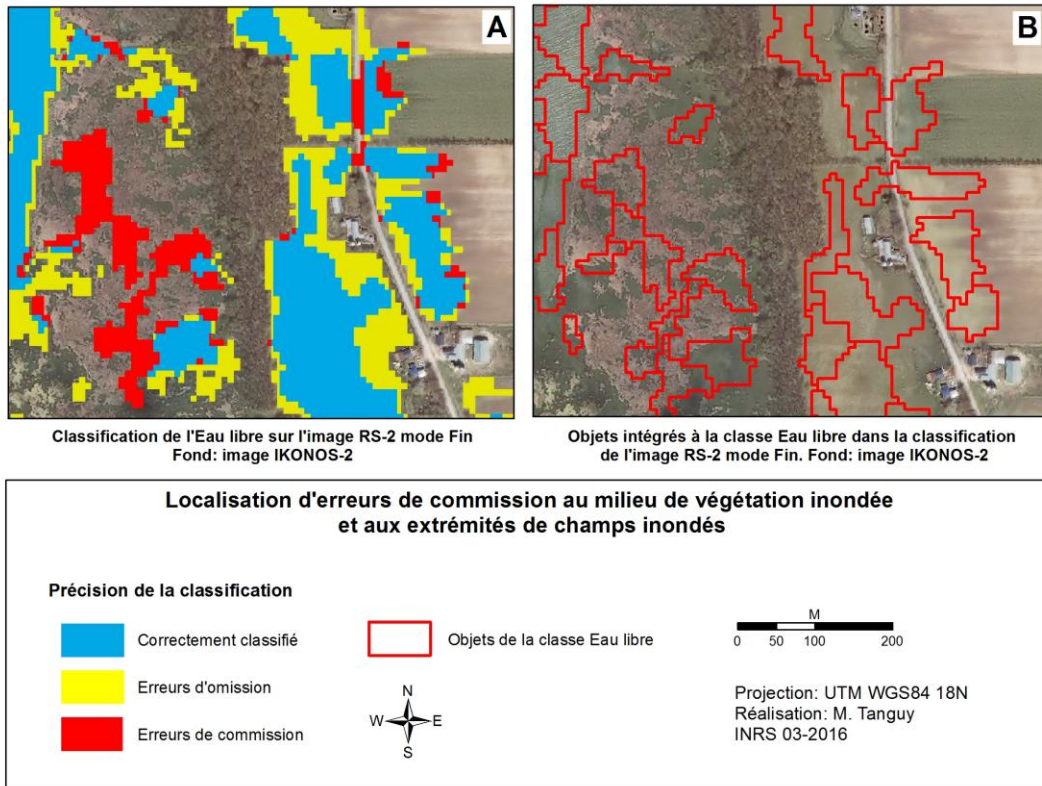


Figure 4.9: Localisation d'erreurs de commission au milieu de végétation inondée et aux extrémités de champs inondés

4.1.2 Classification raffinée de l'eau libre

Le raffinement de la classification initiale des objets d'eau libre est réalisé tout d'abord à l'aide des valeurs d'appartenance des objets à la classe Eau libre, puis à l'aide de leur intervalle maximum de récurrence d'inondation, extrait de la carte des intervalles de récurrence d'inondation estimés en tout point de la plaine inondable de la rivière Richelieu. Cette carte, obtenue à l'aide de la méthode présentée dans la section 3.1.1, est présentée à la Figure 4.10.

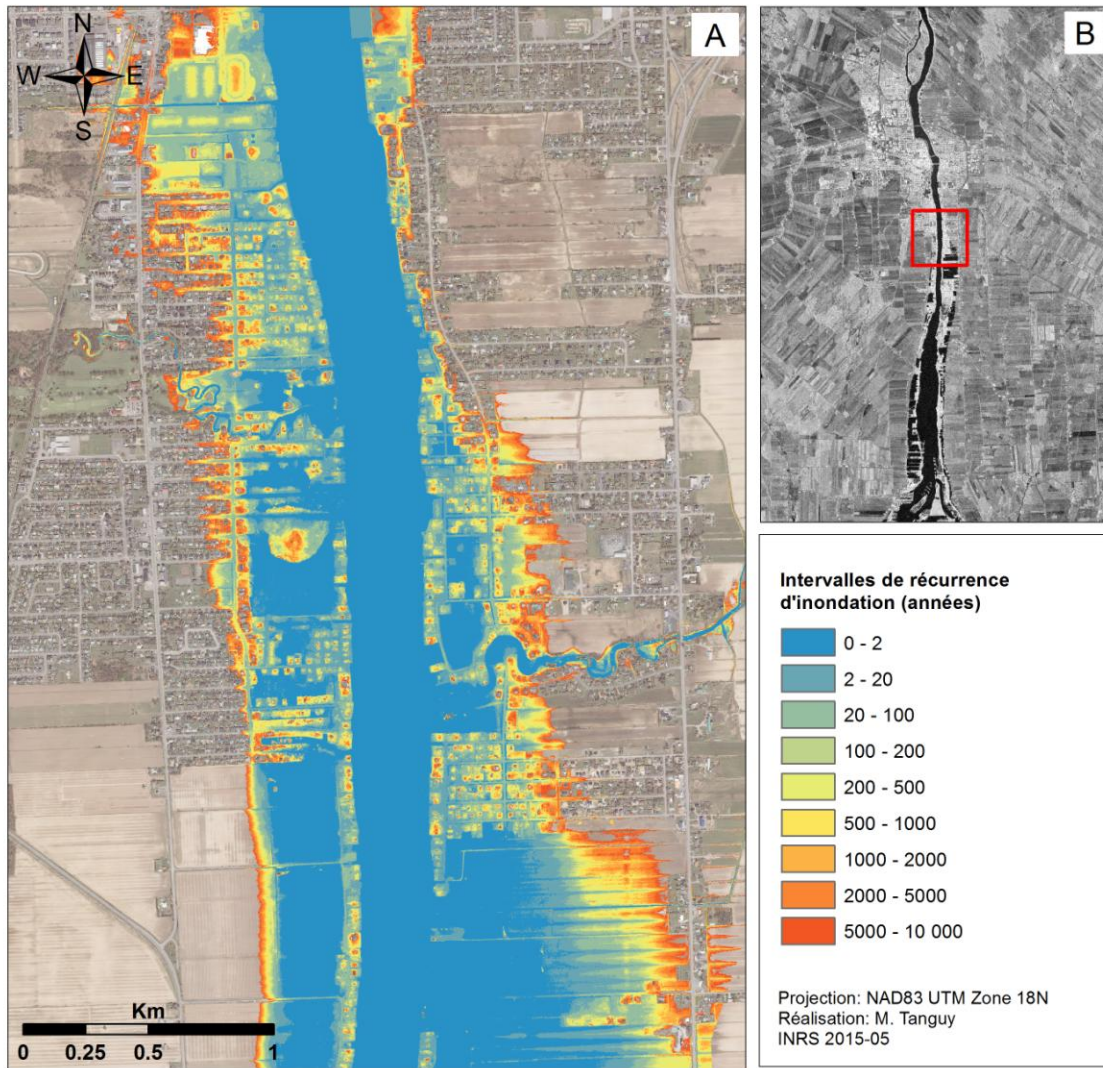


Figure 4.10: Carte des intervalles de récurrence d'inondation estimée pour la rivière Richelieu (A) et localisation de la zone présentée (B)

Les résultats des deux étapes de raffinement de la classification des objets d'Eau libre sont présentés au Tableau 4.3, pour les deux images RS-2 disponibles. Ces résultats ont été obtenus en comptabilisant le nombre de pixels communs aux données de validation de l'étendue de l'inondation et à la classe Eau libre obtenue à l'issue de chaque étape; le nombre de pixels inondés selon les données de validation mais qui n'ont pas été inclus dans la classe Eau libre; et enfin le nombre de pixels non inondés selon les données de validation mais qui ont été inclus dans la classe Eau libre. Ces résultats sont exprimés en pourcentage des pixels appartenant à la classe Eau libre sur les données de validation. Les résultats de la classification

initiale sont indiqués dans le but de mettre en relief la pertinence de chaque étape de raffinement. Les Tableaux A2.1 et A2.2 de l'Annexe II présentent l'ensemble de ces résultats, exprimés en nombre de pixels. On doit souligner que le degré d'appartenance de 0,5 à la classe Eau libre, utilisé au cours de la première étape de raffinement de la classification, se situe à -17,51 dB dans le cas de l'image en mode Ultra-Fin et à -19,76 dB pour le cas de l'image en mode Fin.

Tableau 4.3: Précision de la classification des surfaces en eau libre pour les images RADARSAT-2 en mode Ultra-Fin et en mode Fin

Image RS-2	Étapes de classification de l'eau libre	Correctement classifiés (%)	Erreurs d'omission (%)	Erreurs de commission (%)
mode Ultra-Fin	Classification Initiale	65	35	30
	Raffinement avec degrés d'appartenance	64	36	18
	Puis avec intervalles de récurrence d'inondation	64	36	1
mode Fin	Classification initiale	88	12	10
	Raffinement avec degrés d'appartenance	87	13	5
	Puis avec intervalles de récurrence d'inondation	87	13	2

(%) des pixels identifiés comme Eau libre sur les données de validation

L'analyse du Tableau 4.3 met en évidence le fait que l'utilisation des degrés d'appartenance des objets à la classe Eau libre et des données d'intervalles de récurrence d'inondation permet une diminution significative des erreurs de commission.

On constate tout d'abord que l'utilisation du degré d'appartenance « supérieur ou égal à 0,5 » à la classe Eau libre mène à une première réduction significative des erreurs de commission, et cela pour les deux images RS-2. Elles diminuent en effet à 18% pour l'image en mode Ultra-Fin et à 5% pour l'image en mode Fin. La précision de la classification ne se trouve pas dégradée de manière importante pour autant, puisque les erreurs d'omission n'augmentent que de 1%.

Cependant, à ce stade, les erreurs de commission sont encore trop nombreuses pour garantir l'extraction de l'intervalle de récurrence d'inondation permettant une cartographie précise des zones urbaines et rurales inondées. C'est le cas en particulier pour l'image en mode Ultra-Fin : de nombreuses surfaces urbaines asphaltées et des zones de pelouse persistent dans la classe Eau libre, comme illustré au panneau A de la Figure 4.11 (ces surfaces ont une couleur rouge sur la figure).

Ce type de surfaces constitue également la majorité des sources d'erreurs de commission persistant sur la classification de l'image mode Fin après cette première étape de raffinement (voir le panneau B de la Figure 4.11). Cependant, pour cette image, l'utilisation du degré d'appartenance « supérieur ou égal à 0,5 » à la classe Eau libre a permis de supprimer la majorité des erreurs de commission localisées en zone rurale sur des champs nus et lisses.

Les valeurs d'appartenance à la classe Eau libre des objets contenant des erreurs de commission après cette première étape de raffinement de la classification ont été extraites et comparées à celles des objets d'Eau libre correctement classifiés, et cela pour les deux cas d'étude. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 4.12.

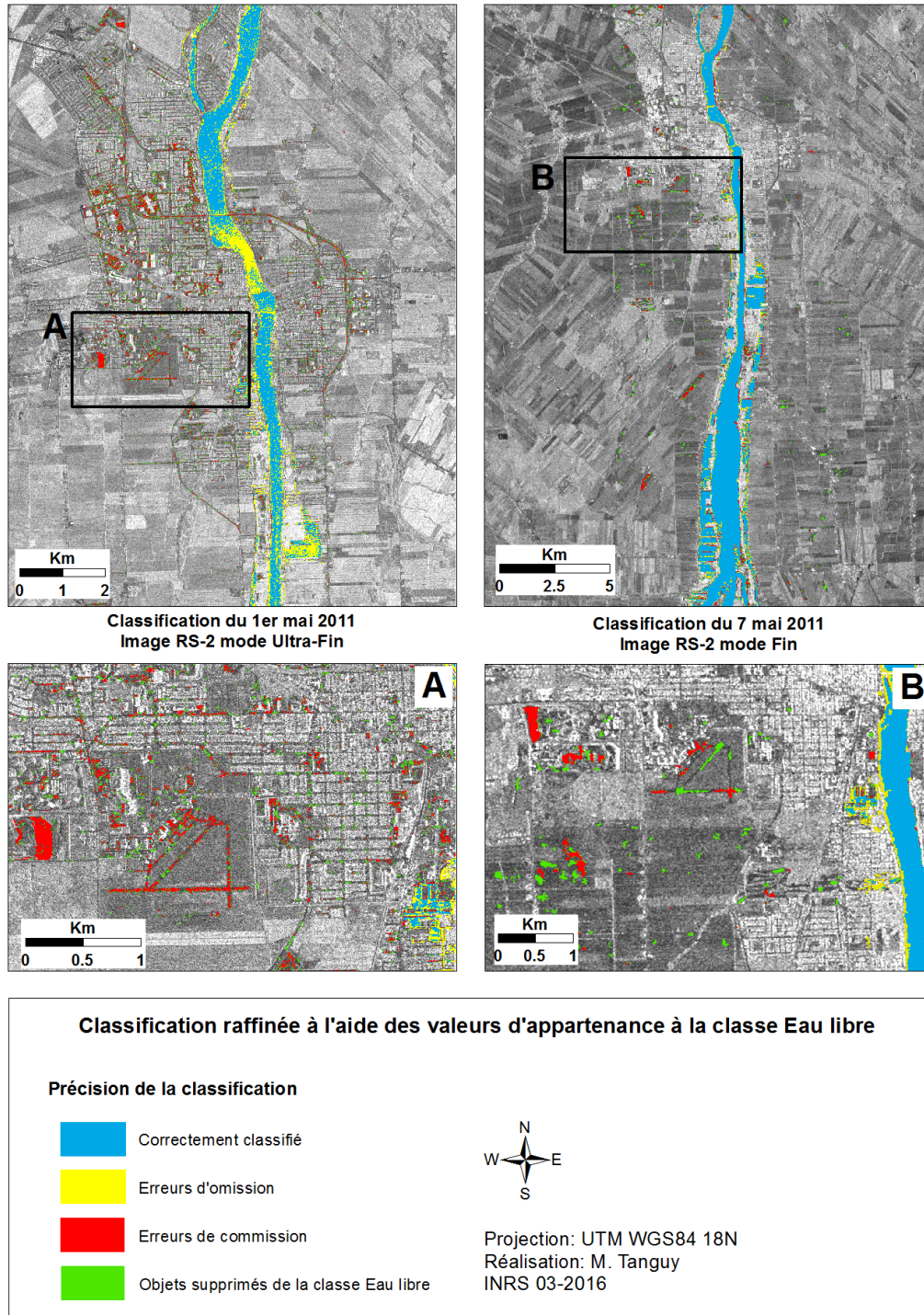


Figure 4.11: Résultats de la classification de l'eau libre après l'étape de raffinement basée sur les degrés d'appartenance à la classe Eau libre

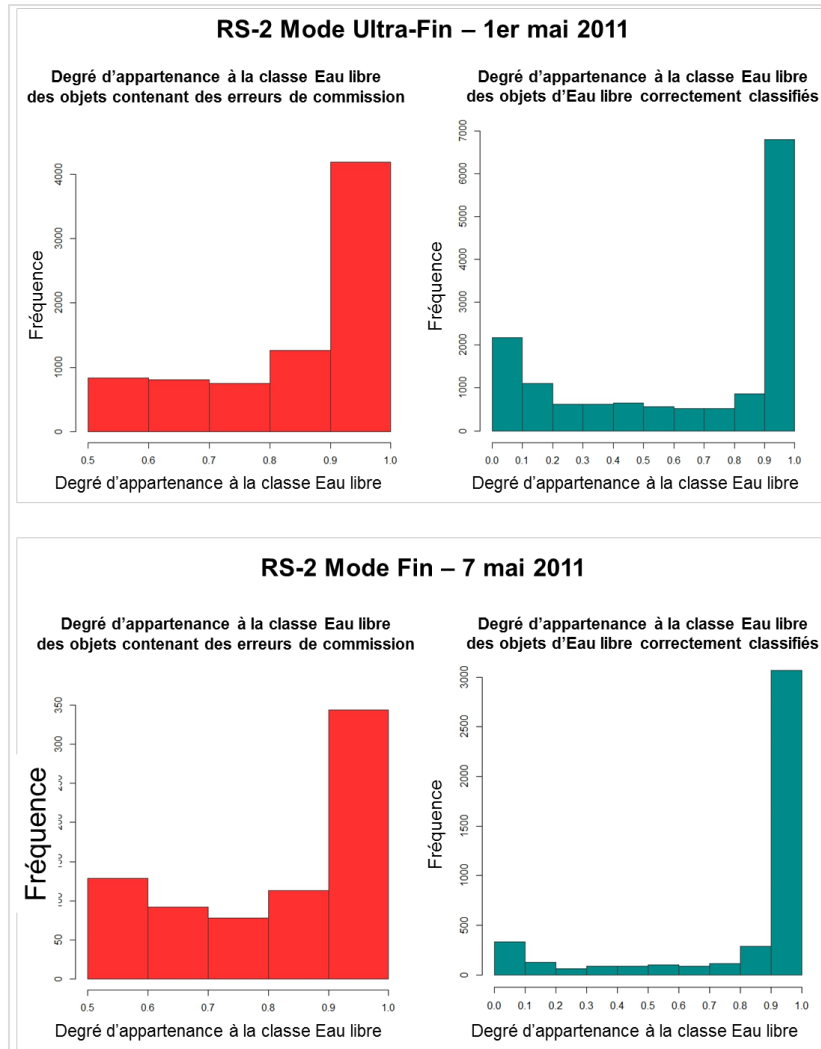


Figure 4.12: Histogramme des fréquences des valeurs d'appartenance à la classe Eau libre des objets contenant des erreurs de commission après la première étape de raffinement de la classification

Dans les deux cas d'étude, les degrés d'appartenance à la classe Eau libre des objets contenant des erreurs de commission sont relativement bien distribués entre les degrés d'appartenance 0,5 et 0,9. Ils ne laissent pas apparaître de rupture ou de seuil qui pourrait permettre de définir un degré d'appartenance différenciant les objets contenant des erreurs de commission des objets d'Eau libre correctement classifiés. De plus, les objets contenant des erreurs de commission ayant un degré d'appartenance à la classe Eau libre situé dans l'intervalle [0,9;1] sont particulièrement nombreux, et cela dans les deux cas. Étant donné la distribution des degrés d'appartenance des objets d'Eau libre correctement classifiés, il est évident que l'utilisation d'un degré d'appartenance à la classe Eau libre supérieur à 0,5 pourrait

mener à une diminution plus importante des erreurs de commission, mais s'accompagnerait d'une augmentation des erreurs d'omission. Ainsi, les objets représentant des surfaces urbaines et les sols nus et lisses ne peuvent être distingués des objets d'eau libre sur la base de leurs valeurs moyennes de rétrodiffusion uniquement. Une seconde étape de raffinement de la classification est donc bien essentielle.

La méthode consistant à estimer la récurrence maximale d'inondation de l'ensemble des objets ayant un degré d'appartenance à la classe Eau libre supérieur ou égal à 0,5, puis à ne conserver que les objets de la classification initiale ayant un intervalle de récurrence d'inondation inférieur ou égal à cet intervalle maximal s'avère être particulièrement efficace. Elle permet en effet de réduire les erreurs de commission à seulement 1% pour l'image en mode Ultra-Fin et à 2% pour l'image en mode Fin (Tableau 4.3). Les taux de pixels correctement identifiés restent inchangés. Ainsi, l'utilisation du 99^{ème} percentile de l'intervalle de récurrence d'inondation extrait des objets conservés dans la classe Eau libre à l'issue de la première étape d'affinement de la classification n'engendre pas la suppression d'objets correctement classifiés et permet de supprimer la majorité des erreurs de commission. La Figure 4.13 présente la carte de contingence de la classe Eau libre obtenue à l'issue des étapes de raffinement de la classification.

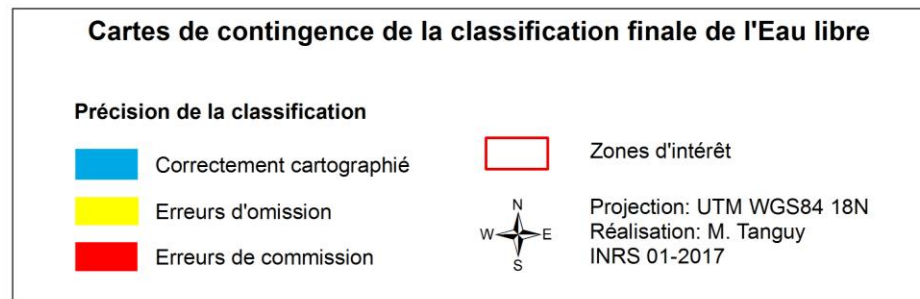
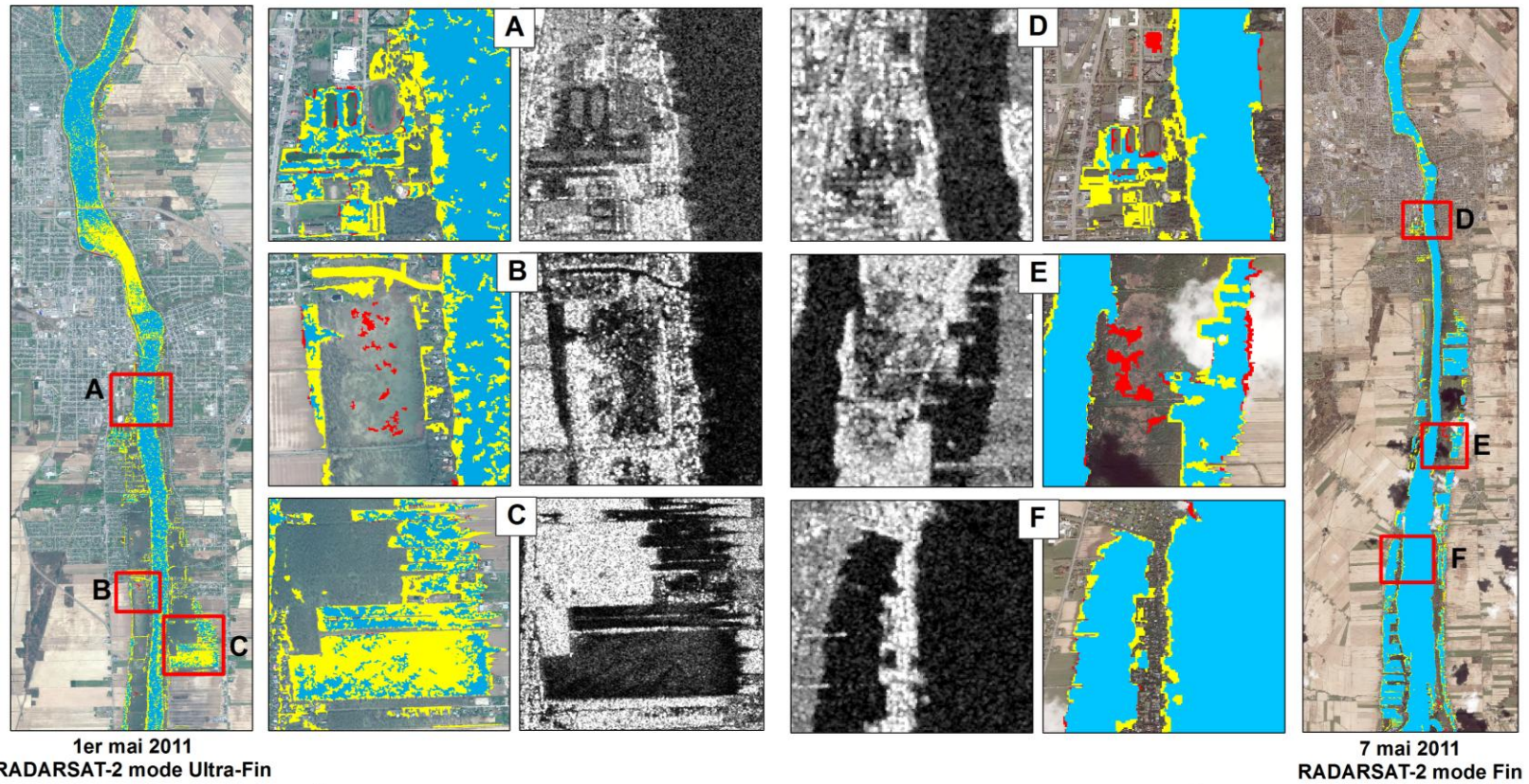


Figure 4.13: Carte de contingence de la classification de l'Eau libre obtenue à l'issue des étapes de raffinement de la classification

Après cette seconde étape de raffinement, les erreurs de commission dues à des surfaces urbaines non inondées sont triviales. Sur l'image en mode Fin, seul un stationnement non inondé situé à proximité du chenal de la rivière a été conservé dans la classe Eau libre (panneau D de la Figure 4.13). Aucune erreur de ce genre n'est présente sur l'image en mode Ultra-Fin. Les intervalles de récurrence d'inondation permettent ainsi de faire la distinction entre les objets d'Eau libre et les objets représentant des surfaces urbaines non inondées, et ayant des valeurs moyennes de rétrodiffusion proches, voire identiques. Ces données permettent ainsi de s'affranchir de la présence des surfaces urbaines ayant une rétrodiffusion de type spéculaire mais aussi des ombres causées par les bâtiments, qui sont une des principales sources d'erreurs de détection des zones inondées en milieu urbain, et cela en particulier quand de l'imagerie RSO de très haute résolution spatiale est utilisée.

Comme présenté sur les panneaux (B) et (E) de la Figure 4.13, certaines des erreurs de commission qui persistent après les deux étapes de raffinement de la classification se trouvent au milieu de zones de végétation inondée et de zones humides situées entre le chenal de la rivière et les champs inondés. Ces zones étant réellement inondées et ayant un intervalle de récurrence d'inondation peu élevé, le fait qu'elles soient conservées dans la classe Eau Libre à l'issue des étapes de raffinement est donc logique. De très rares erreurs de commission persistent également aux extrémités des champs inondés, comme le montrent les panneaux (C) et (F) de la Figure 4.13. Ces erreurs de commission sont, on le rappelle, en partie dues à des imprécisions des données de validation. Étant donné leur très faible nombre, leur impact sur l'extraction de l'intervalle de récurrence d'inondation permettant la cartographie des zones urbaines et rurales inondées devrait être minime.

4.1.3 Pertinence de la position des seuils σ_1^0 et σ_2^0

Au cours des sous-sections précédentes, il a été montré que les erreurs d'omission associées à la classification de l'Eau libre sur les images RS-2 en mode Fin et en mode Ultra-Fin sont dues à l'effet du vent sur les plans d'eau, mais aussi à la présence de végétation bordant les champs inondés et le chenal de la rivière. Dans ces deux cas de figure, cela se traduit par des pixels aux valeurs de rétrodiffusion plus élevées que celles de l'eau libre, et regroupés au sein d'objets présentant des valeurs de rétrodiffusion moyennes elles aussi nettement plus élevées que celle des objets d'eau libre adjacents.

La présence de ces erreurs d'omission soulève la question de la pertinence de la position des seuils σ_1^0 et σ_2^0 utilisés pour la classification par logique floue des objets d'Eau libre. L'extraction des valeurs de rétrodiffusions moyennes des objets contenant des erreurs d'omission a montré que dans le cas de l'image en mode Ultra-Fin, ces objets ont des valeurs moyennes comprises entre -14,69 dB et 2,88 dB. Dans le cas de l'image en mode Fin, ces valeurs sont comprises entre -16,55 dB et 1,66 dB. Ainsi, même en modifiant les positions des seuils σ_1^0 et σ_2^0 , il n'est pas possible d'intégrer l'ensemble de ces objets à la classe Eau libre.

Il est par contre évident que les erreurs d'omission pourraient être au moins en partie réduites si les seuils σ_1^0 et σ_2^0 étaient positionnés au niveau de valeurs de rétrodiffusion moyennes légèrement plus élevées. Cependant, la modification de la position de ces seuils aura dans tous les cas pour effet de faire augmenter les erreurs de commission. Celles-ci s'élèvent déjà, on le rappelle, à 30% pour la classification initiale des zones d'eau libre sur l'image en mode Ultra-Fin et à 10% sur l'image en mode Fin avec la position attribuée aux seuils σ_1^0 et σ_2^0 dans la méthode ici utilisée. Le raffinement de la classification à l'aide du degré d'appartenance à la classe Eau libre aura ainsi un impact moins important, puisqu'un plus grand nombre d'objets ne correspondant pas à de l'Eau libre se verront attribuer un degré d'appartenance à cette classe supérieur ou égal à 0,5. La section 4.1.2 a d'ailleurs permis de souligner que même avec la position actuelle des seuils σ_1^0 et σ_2^0 , le degré d'appartenance à la classe Eau libre ne permet pas de distinguer de manière suffisamment précise les objets d'Eau libre des objets représentant le reste de l'occupation du sol. La seconde étape de raffinement de la classification aura elle aussi un impact plus limité. L'intervalle de récurrence d'inondation extrait de l'ensemble des objets conservés dans la classe Eau libre à l'issue de la première étape de raffinement de la classification sera en effet surestimé, ce qui ne permettra pas de réduire de manière efficace les erreurs de commission. De plus, les objets contenant des erreurs d'omission intègrent des pixels représentant des surfaces non inondées. Les erreurs de commission situées directement au contact des surfaces correctement classifiées vont ainsi augmenter. Cela risque d'engendrer une surestimation de l'intervalle de récurrence d'inondation extrait des objets d'Eau libre et utilisé pour déterminer l'étendue des zones urbaines et rurales inondées.

Ainsi, la modification de la position des seuils σ_1^0 et σ_2^0 vers des valeurs permettant d'inclure une partie des objets contenant des erreurs d'omission dans la classe Eau libre n'apparaît pas être une solution entièrement pertinente. Il est préférable de limiter les erreurs de commission, même si cela implique de conserver un certain nombre d'erreurs d'omission.

En revanche, la section 4.1.2 a montré que l'application de la valeur d'appartenance « supérieur ou égal à 0,5 » au cours de la première étape de raffinement de la classification libre permet une diminution notable (même si elle n'est que partielle) des erreurs de commission, et cela sans augmentation majeure des erreurs d'omission. Cela signifie donc que la position du seuil σ_2^0 tend bien à surestimer la présence d'eau libre sur l'image, comme on l'avait anticipé dans la section 3.1.4. Cependant, positionner le seuil σ_2^0 au niveau de plus basses valeurs de rétrodiffusions moyennes aurait aussi pour effet de réduire le nombre d'objets correspondant réellement à de l'Eau libre ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à 0,5 à cette classe. L'intervalle de récurrence d'inondation extrait de cette première reclassification de l'Eau libre devrait ainsi être sous-estimé, ce qui risque également d'engendrer une sous-estimation de l'intervalle de récurrence d'inondation extrait des objets d'Eau libre et utilisé pour déterminer l'étendue des zones urbaines et rurales inondées. La modification du seuil σ_2^0 vers de plus basses valeurs de rétrodiffusions moyennes ne semble donc pas pertinente.

4.2 Cartographie des zones urbaines et rurales inondées

L'intervalle de récurrence d'inondation extrait de la classification finale de l'eau libre est de 186 ans pour l'image en mode Ultra-Fin et de 219 ans pour l'image en mode Fin. Ces intervalles de récurrence d'inondation sont donnés à titre indicatif, et ne sont pas représentatifs des récurrences d'inondation correspondant aux débits ou aux niveaux d'eau enregistrés les 1^{er} et 7 mai 2011 aux stations de jaugeage situées le long de la rivière. Ces valeurs devraient plutôt être considérées comme des indicateurs relatifs à la dynamique de la plaine inondable. Ils permettent de déduire le statut d'inondation des différents points de la plaine inondable, selon leur valeur d'intervalle de récurrence d'inondation par rapport à celles des zones inondées identifiées avec certitude.

La comparaison de ces valeurs avec celles estimées par l'analyse hydrologique réalisée en 2006 par le CEHQ pour la portion de la rivière Richelieu ici étudiée a révélé des différences importantes. Selon l'analyse hydrologique, le débit de $1450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ enregistré le 1^{er} mai 2011 à 07h17 à la station Richelieu aux Rapides Fryers (02OJ007) (soit au moment de l'acquisition de l'image en mode Ultra-Fin) devrait correspondre à une période de retour proche de 1000 ans. Le débit de $1530 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ enregistré le 7 mai à 18h59 devrait quant à lui correspondre à un débit d'une récurrence proche de 10 000 ans (CEHQ, 2006). Cependant, on doit souligner que

l'analyse statistique réalisée pour estimer les débits de crue de récurrence ne s'est basée que sur 28 débits maximaux annuels enregistrés de 1973 à 2000, dont le plus important s'élève à $1260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Aucun débit similaire ou excédant ceux mesurés les 1^{er} mai et 7 mai 2011 n'y a donc été intégré. Une nouvelle analyse fréquentielle intégrant le débit maximum de l'année 2011 devrait ainsi être réalisée afin d'obtenir une estimation de la récurrence d'inondation maximale de cet évènement.

Le Tableau 4.4 présente l'évaluation quantitative de la précision de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées résultant de l'application de l'intervalle de récurrence extrait de la classification de l'eau libre à l'ensemble de la plaine inondable, et cela pour chaque date étudiée. Il y est fait état du pourcentage de pixels inondés correctement identifiés dans la cartographie, et des pourcentages d'erreurs d'omission et de commission.

Tableau 4.4: Évaluation quantitative des cartographies des zones urbaines et rurales inondées

Image RS-2	Milieu	Correctement identifiés (%)*	Erreurs	
			d'omission (%)*	de commission (%)*
Mode Ultra-Fin	Urbain	86	14	13
	Rural	97	3	35
Mode Fin	Urbain	87	13	14
	Rural	98	2	3

** En (%) des pixels identifiés comme inondés par les données de validation*

Ces résultats ont été obtenus en comparant le nombre de pixels cartographiés comme inondés à l'aide de la méthode proposée au nombre de pixels identifiés comme inondés dans les données de validation. Les matrices d'erreurs ayant permis de calculer ces valeurs, et exprimées en nombre de pixels, sont présentées dans les Tableaux A2.3 et A2.4, à l'Annexe II. Il est à noter que pour ces deux tableaux, les plans d'eau libre permanents, à savoir le chenal de la rivière Richelieu et ses tributaires, sont inclus dans ces valeurs.

De plus, les résultats sont considérés de manière séparée pour les surfaces urbaines et les surfaces rurales. Ces deux types de surfaces ont été distingués à l'aide de données d'occupation du sol à l'échelle 1 :20 000, fournies par la Base de Données Topographiques du Québec. On considère comme surfaces rurales les champs, les bois et les forêts, les zones de végétation ainsi que les milieux humides, soit l'ensemble des surfaces généralement exemptes de bâtiments. Sont considérées comme surfaces urbaines l'ensemble des surfaces bâties, ce qui inclut les zones résidentielles, les surfaces commerciales et les surfaces industrielles. Les zones résidentielles et les corps de ferme sont également considérés comme des surfaces urbaines, car des bâtiments résidentiels et ainsi de la population sont sensés y être présents.

Une analyse qualitative de la précision des cartographies, mais aussi de leurs aspects finaux, sont également présentés sous forme de cartes de contingence, dans la Figure 4.14. Des agrandissements ont été réalisés dans certaines zones afin de permettre d'apprécier la qualité de la cartographie à une échelle plus fine.

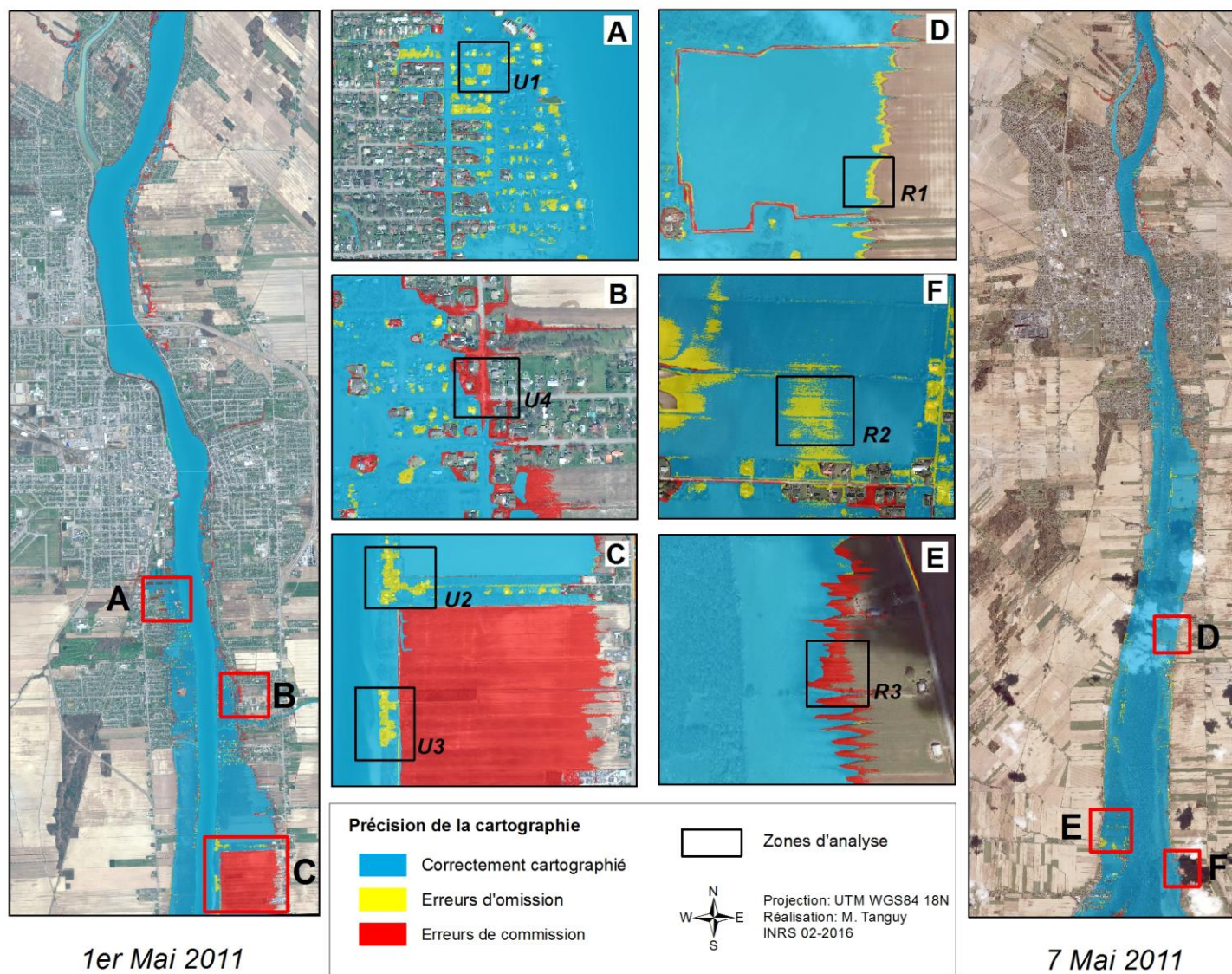


Figure 4.14: Cartographies des zones inondées pour les 1er mai (image RS-2 mode Ultra-Fin) et 7 mai 2011 (image RS-2 mode Fin) et des erreurs associées

Le Tableau 4.4 permet de mettre en relief les taux élevés de pixels urbains et ruraux inondés correctement identifiés par les deux cartographies. Dans le cas de la cartographie du 1^{er} mai, 86% des pixels inondés présents en zone urbaine ont été correctement identifiés. La cartographie est encore plus précise en zone rurale, où 97% des pixels inondés ont été correctement identifiés. Considérant le faible taux de zones inondées en eau libre correctement classifiées sur l'image RS-2 en mode Ultra-Fin, l'extraction d'un intervalle de récurrence d'inondation permettant une cartographie précise des zones urbaines et rurales inondées était initialement peu probable. Cependant, l'identification d'un nombre suffisant d'objets d' Eau libre situés aux extrémités des zones inondées en eau libre ainsi que les faibles erreurs de commission associées à la classification finale de l'eau libre ont permis l'extraction d'un intervalle de récurrence d'inondation approprié. Les résultats obtenus pour le cas d'étude du 7 mai 2011, pour lequel la classification de l'eau libre était plus précise, sont très proches de ceux du 1^{er} mai : 87% des zones urbaines inondées et 98% des zones rurales inondées ont été correctement cartographiées.

Ces premiers résultats suggèrent que si l'identification de l'ensemble des zones inondées en eau libre est préférable, elle n'est pas indispensable pour permettre une cartographie précise des zones urbaines et rurales inondées, à condition que les erreurs de commission soient faibles. Ces erreurs de commission étant réduites de manière efficace au cours des étapes de raffinement de la classification de l'eau libre, on peut en conclure que la méthode proposée permet ainsi de produire des résultats précis à partir d'une image radar dont une partie des surfaces d'eau libre sont affectées par la présence de vent.

Si les erreurs de commission associées à la cartographie du 1^{er} mai sont relativement faibles en zone urbaine (13%), elles sont nettement plus élevées en zone rurale, puisque le taux d'erreurs de commission y atteint 35%. Pour le cas du 7 mai, les erreurs d'omission d'élèvent à 14% en zone urbaine mais à seulement 3% en zone rurale. Les sources des erreurs d'omission et de commission associées à chaque cartographie seront analysées et discutées par la suite.

4.2.1 Analyse des erreurs de sous-estimation de l'étendue de l'inondation

L'analyse des erreurs de sous-estimation de l'étendue de l'inondation s'est tout d'abord intéressée aux zones urbaines, pour lesquelles les taux d'erreurs d'omission sont plus élevés. On peut remarquer que pour les cartographies du 1^{er} et du 7 mai, une très grande partie de ces erreurs prend la forme de surfaces isolées et de superficie réduite, situées au niveau de bâtiments et entourées de zones inondées qui sont, elles, correctement identifiées (Figure 4.15). Les erreurs d'omission sont en revanche très peu nombreuses aux extrémités des zones inondées, où les erreurs de commission prévalent.

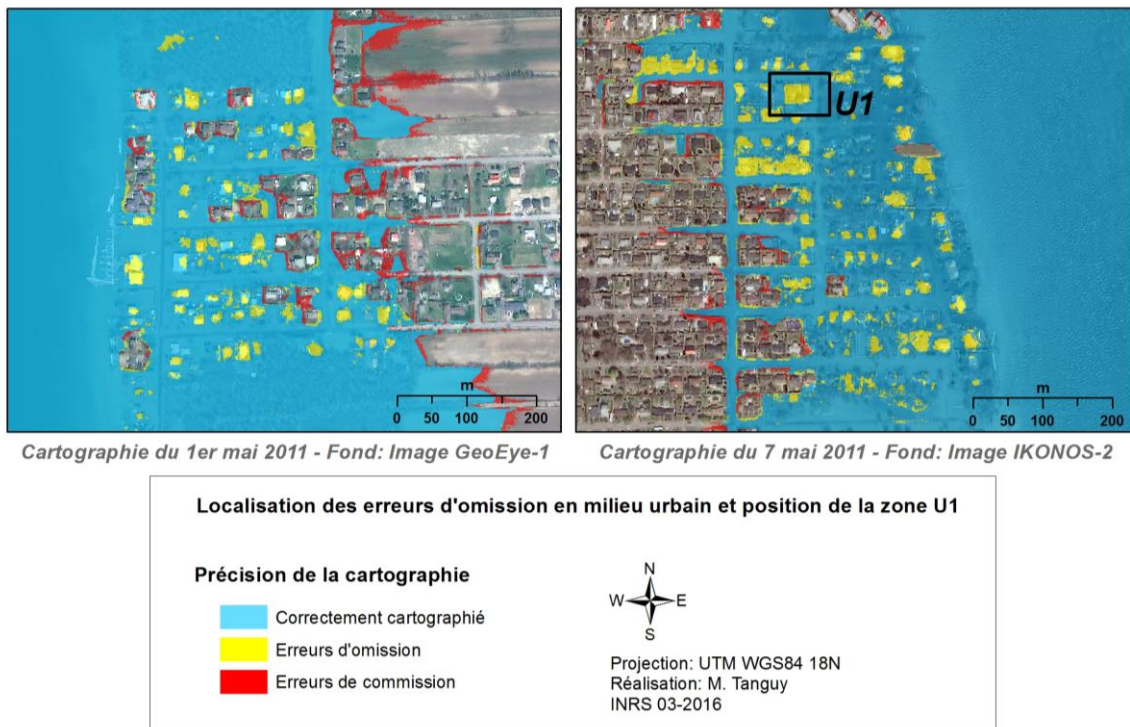


Figure 4.15: Localisation des zones de sous-estimation (en jaune) et de surestimation (en rouge) de la présence d'eau en zone urbaine

Des coupes transversales ont été réalisées dans ces zones, afin d'en extraire les valeurs d'élévation du sol et des surfaces d'eau de récurrences 2, 20 et 100 ans, ainsi que les intervalles de récurrence d'inondation. A titre d'exemple, les Figure 4.16 et Figure 4.17

présentent les valeurs extraites d'une coupe transversale réalisée d'est en ouest dans la zone U1, localisée sur la Figure 4.15.

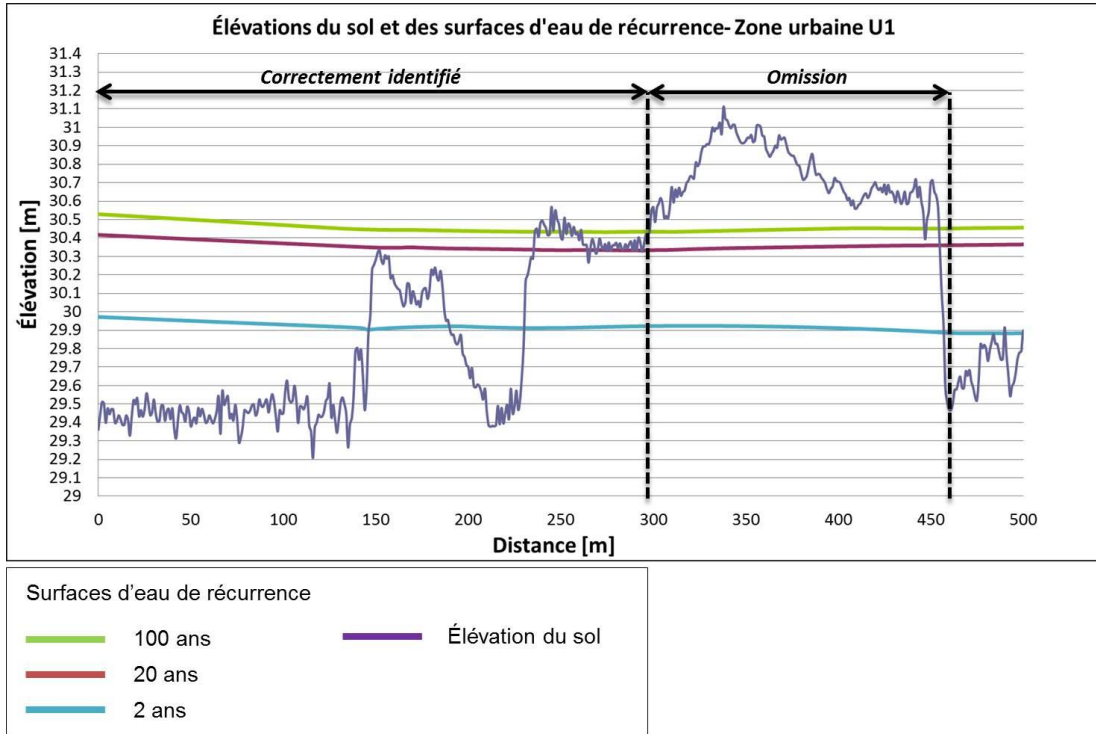


Figure 4.16: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U1

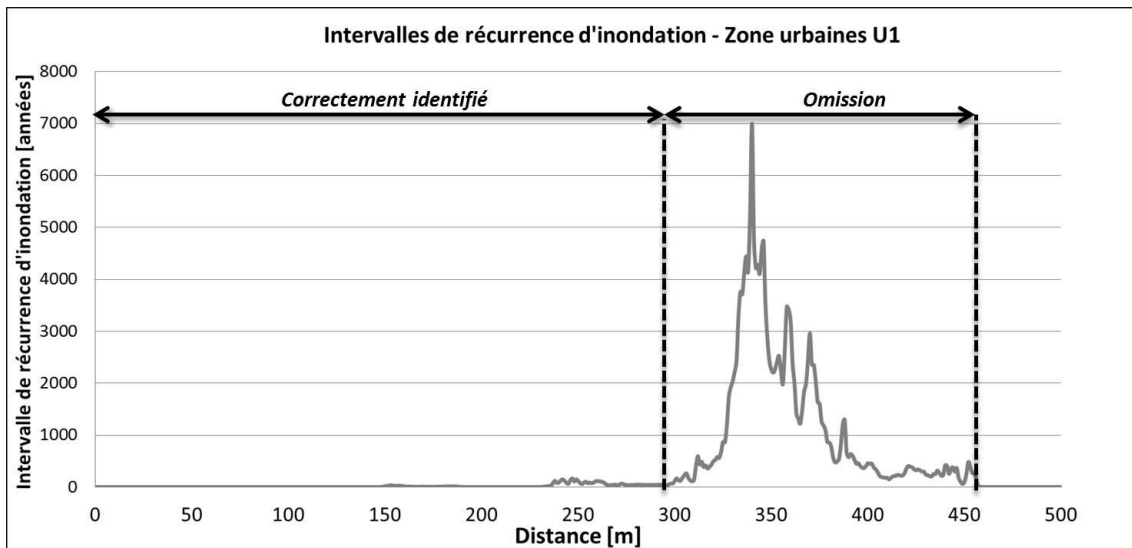


Figure 4.17: Intervalles de récurrence d'inondation extraits de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U1

L'analyse de ces différentes valeurs et de leurs évolutions permet de constater que les élévations des surfaces d'eau de récurrence ne présentent pas d'anomalies à ces endroits : les différentes surfaces d'eau ne se superposent pas, leurs élévations suivent des tendances similaires et ne présentent pas de valeurs aberrantes (Figure 4.16). Les intervalles de récurrence d'inondation augmentent de manière importante, mais cela est en lien avec une augmentation de l'élévation du sol, allant par endroit de 50 cm à plus d'1 m (Figure 4.17).

Une explication logique à ces augmentations modérées de l'élévation du sol est la présence d'aménagements aux abords directs et au contact des bâtiments (ex : aménagements paysagers, entrées de garage, présence d'un sous-sol obligeant la surélévation du premier plancher de l'habitation, etc.). Cette augmentation de l'élévation du sol, même modérée, peut cependant faire la différence entre un bâtiment qui est atteint par l'eau et un bâtiment qui ne l'est pas. Cette théorie a été vérifiée par l'analyse visuelle des aménagements entourant certains bâtiments concernés par ces erreurs d'omission, et de bâtiments considérés comme inondés par les cartographies du 1^{er} et du 7 mai (Figure 4.18). Le service Google Street View© a pour cela été utilisé. Le bâtiment A a été cartographié comme non inondé à cause de la légère surélévation du sol devant sa façade, alors que le bâtiment B, qui repose sur un terrain entièrement plat, a été cartographié comme inondé.

La source de ces erreurs de confusion se trouve ainsi dans les données de validation de l'étendue de l'inondation. En effet, en dépit de la très haute résolution spatiale des données GeoEye-1 et IKONOS-2 utilisées comme références, la délimitation manuelle de l'inondation a été particulièrement délicate dans les zones urbaines résidentielles, où les bâtiments et la végétation sont souvent rapprochés et ne laissent pas toujours entrevoir la présence ou au contraire l'absence d'eau. Les bâtiments entourés d'eau mais pour lesquels un contact direct entre l'eau et le bâtiment n'a pu être établi, ont donc été considérés comme inondés dans les données de validation. Ainsi, ces erreurs d'omission révèlent bel et bien la présence de zones non inondées, et permettent même de distinguer les bâtiments entièrement inondés des bâtiments uniquement entourés d'eau. Étant donné qu'en milieu urbain, une très grande partie de ces erreurs d'omission suivent la forme précédemment décrite, il est légitime de supposer que les taux réels d'erreurs d'omission sont bien inférieurs aux 14% et 13% estimés pour les cas d'étude du 1^{er} mai et du 7 mai, respectivement. De tels résultats sont possibles grâce à l'utilisation de données d'élévation issues de relevés LIDAR ayant une grande précision planimétrique et altimétrique, ainsi qu'une haute résolution spatiale, permettant de tenir compte de variations d'élévation à petite échelle. Une telle précision de la cartographie de la présence

d'eau autour des bâtiments n'aurait certainement pas été possible à l'aide de données de plus faible résolution spatiale et de moindre précision.

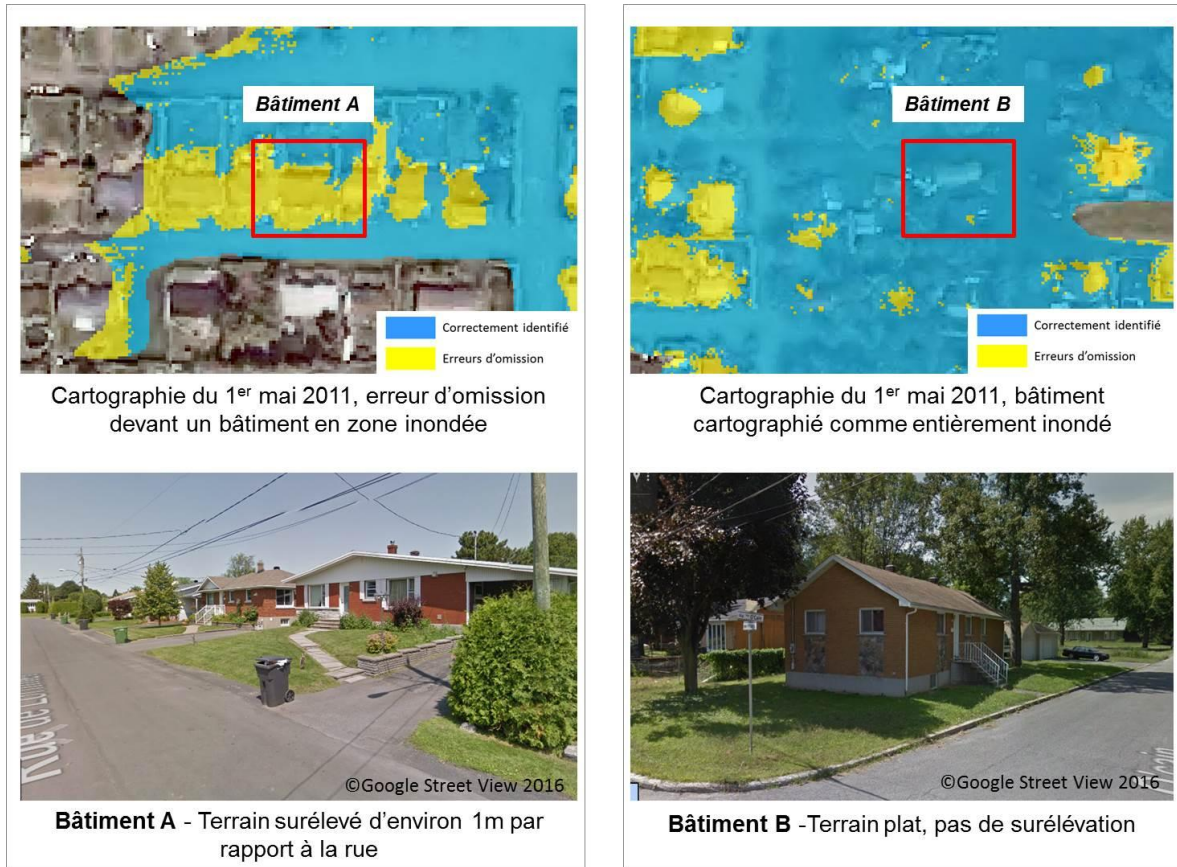


Figure 4.18: Terrain entourant un bâtiment considéré comme non inondé par la cartographie (bâtiment A) et un bâtiment considéré comme inondé (bâtiment B)

Cependant, le cas de deux zones résidentielles situées directement sur le bord du chenal de la rivière Richelieu a permis de révéler l'existence d'une autre source d'erreurs de commission. Ces deux zones résidentielles, situées directement sur le bord du chenal de la rivière Richelieu, ne sont pas inondées selon les cartographies du 1^{er} mai et du 7 mai, alors que la présence d'eau y est clairement visible sur les images GeoEye-1 et IKONOS-2. De plus, selon les limites des plaines inondables de récurrence fournies par le CEHQ, ces deux zones urbaines sont en très grande partie situées dans la plaine inondable de récurrence 100 ans. Ces deux zones, identifiées U2 et U3, apparaissent sur la Figure 4.19.

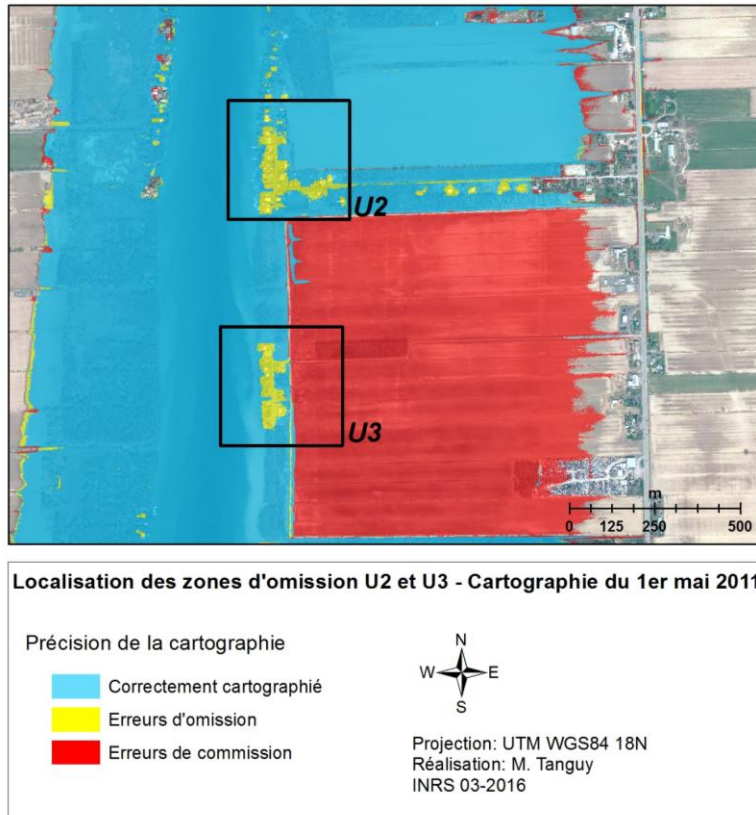


Figure 4.19: Localisation de deux zones urbaines résidentielles inondées (identifiées U2 et U3) considérées comme non inondées dans les cartographies des 1er mai et 7 mai 2011

Comme pour l'exemple précédent, des coupes transversales ont été réalisées dans ces zones, afin d'analyser les valeurs d'élévation du sol, des surfaces d'eau de récurrence et des intervalles de récurrence d'inondation. Ces zones étant situées sur la partie droite de la rivière, la coupe transversale a été réalisée d'ouest en est. Les résultats obtenus dans la zone U2 sont présentés à titre d'exemple dans la Figure 4.20.

L'analyse des variations des élévations des différentes surfaces d'eau de récurrence a permis de révéler des comportements anormaux des surfaces d'eau de récurrence dans les zones d'omission. Comme illustré sur la Figure 4.20, la surface d'eau de récurrence 20 ans a des élévations localement supérieures à celle de récurrence 100 ans, ce qui est anormal. De plus, alors que les élévations des différentes surfaces d'eau de récurrence varient généralement faiblement à travers la plaine inondable et de manière similaire, les surfaces d'eau de récurrence 2 ans et 100 ans présentent une tendance à la diminution de l'ouest vers l'est, en

s'éloignant de la rivière. Il n'est donc pas surprenant que des erreurs d'estimation des intervalles de récurrence d'inondation soient présentes dans ces zones, comme le montre la Figure 4.21.

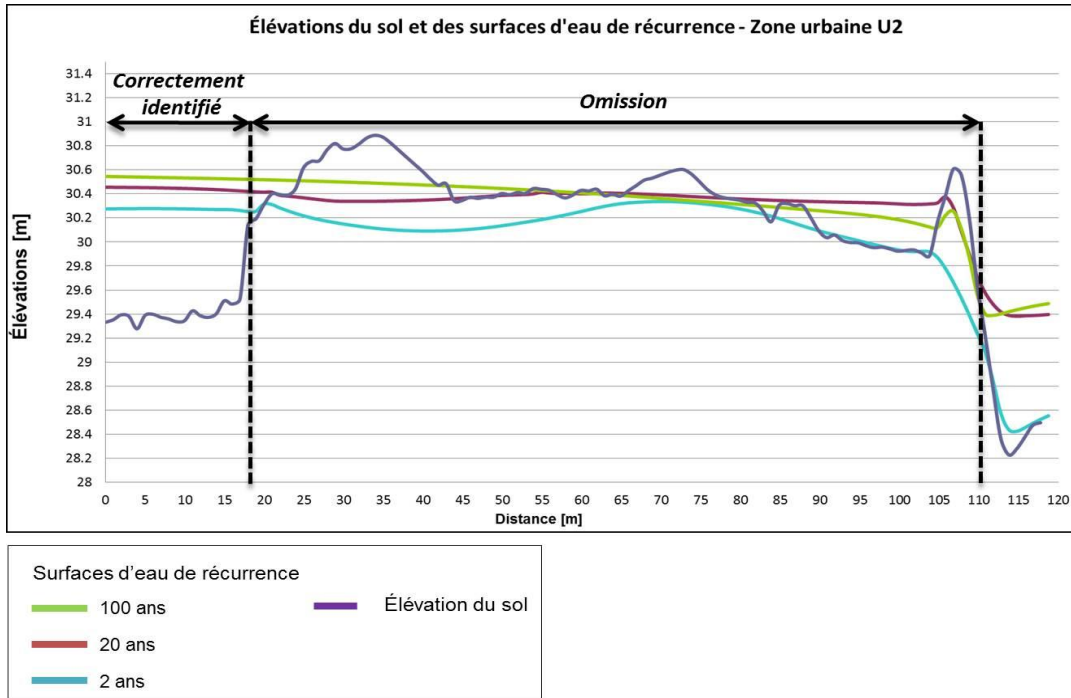


Figure 4.20: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U2

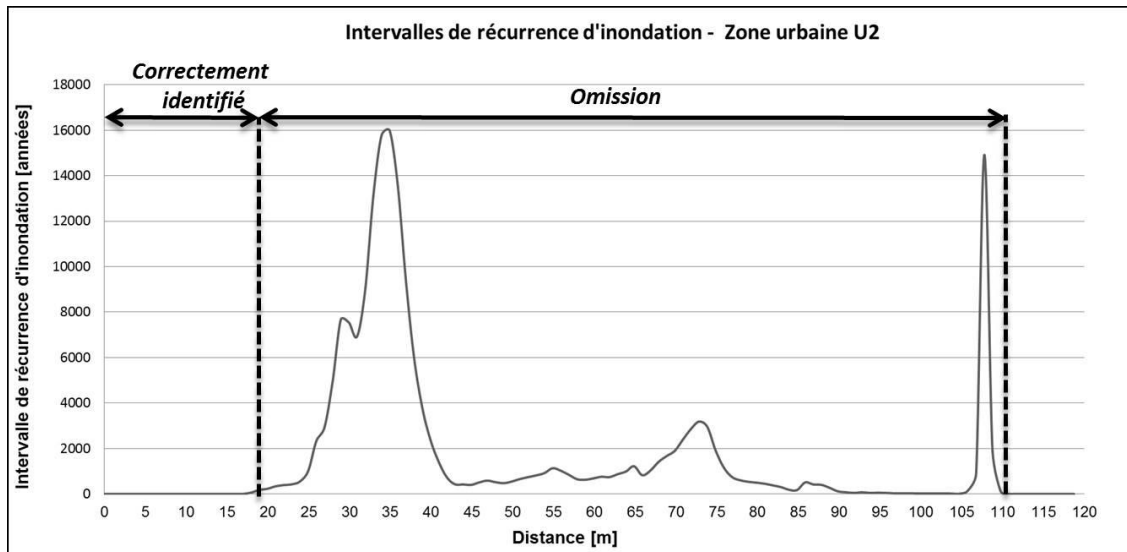


Figure 4.21: Intervalles de récurrence d'inondation extraits de la coupe transversale réalisée dans la zone urbaine U2

La cause de ces anomalies provient des points situés aux limites des plaines inondables, et qui sont utilisés pour la création par interpolation des différentes surfaces d'eau de récurrence. En effet, en plusieurs endroits dans ces zones d'omission, l'élévation des points aux limites des différentes plaines inondables diminue quand on s'éloigne de la rivière, ce qui est anormal. De plus, dans ces zones, certains points matérialisant la limite de la plaine inondable de récurrence 2 ans ont des élévations supérieures à celles des points matérialisant la limite de la plaine inondable de récurrence 20 ans. Il en va de même pour les élévations des points matérialisant les limites des plaines inondables de récurrence 20 ans, qui présentent dans certains cas des élévations supérieures à celles des points de récurrence 100 ans, situés à proximité. La Figure 4.22 illustre un exemple de ce phénomène, pour la partie sud de la Zone U3.

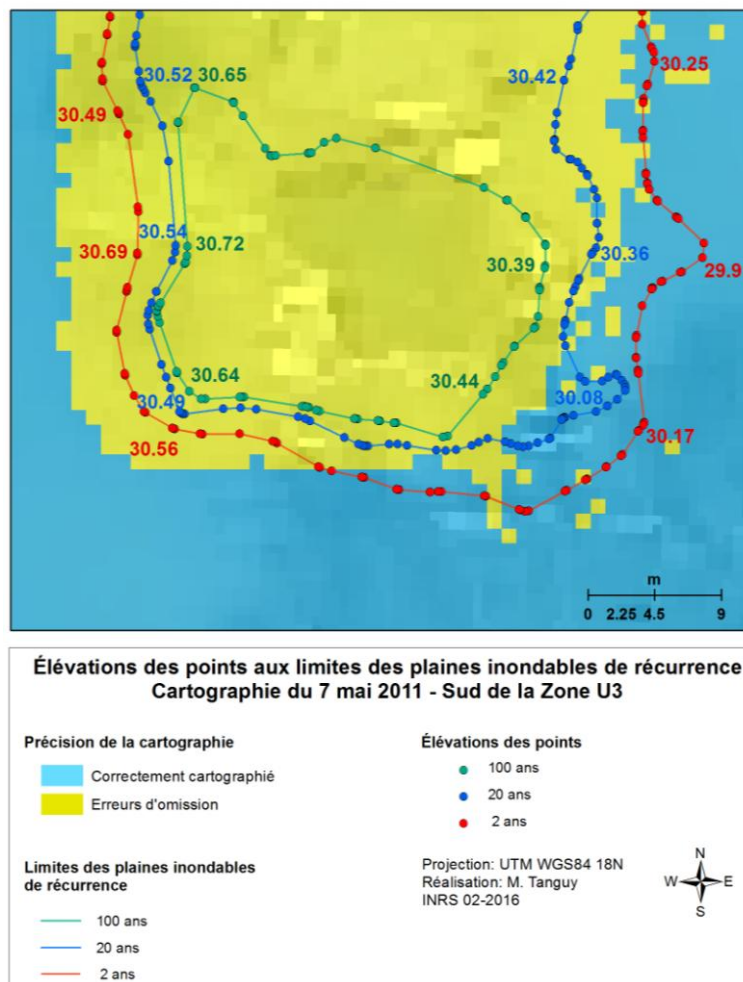


Figure 4.22: Élévations de points aux limites des plaines inondables de récurrences 2 ans, 20 ans et 100 ans, pour une zone représentant des erreurs d'omission

Deux suppositions ont été faites sur la source de ces erreurs. La présence d'un décalage entre le MNE à partir duquel les élévations des points sont extraites et la position des limites des plaines de récurrence d'inondation a tout d'abord été supposée. Un décalage, même peu important, pourrait en effet conduire à l'extraction de valeurs d'élévation inexactes. Cette hypothèse reste cependant peu plausible, puisque le phénomène précédemment mentionné ne se retrouve que dans deux zones restreintes, sur une section de rivière de plus de 23 km. Un tel décalage aurait en effet eu des répercussions sur l'ensemble de la zone d'étude. L'existence d'erreurs locales de positionnement des limites des plaines inondables de récurrence fournies par le CEHQ apparaît être à l'inverse une explication plus probable. Il est également possible que des modifications locales de l'élévation du sol aient eu lieu dans ces zones depuis 2006, année au cours de laquelle les limites des plaines d'inondation ont été créées par le CEHQ. Cependant, aucune donnée d'élévation du sol datant de cette période n'étant à notre disposition, cette hypothèse n'a pu être validée.

En zone rurale, enfin, les erreurs d'omission sont très limitées. Elles s'élèvent à 3% pour la cartographie du 1^{er} mai et à 2% pour la cartographie du 7 mai. Ces erreurs d'omission se retrouvent en grande majorité aux extrémités de champs inondés, et prennent la forme de bandes larges d'une dizaine de mètres (Figure 4.23).

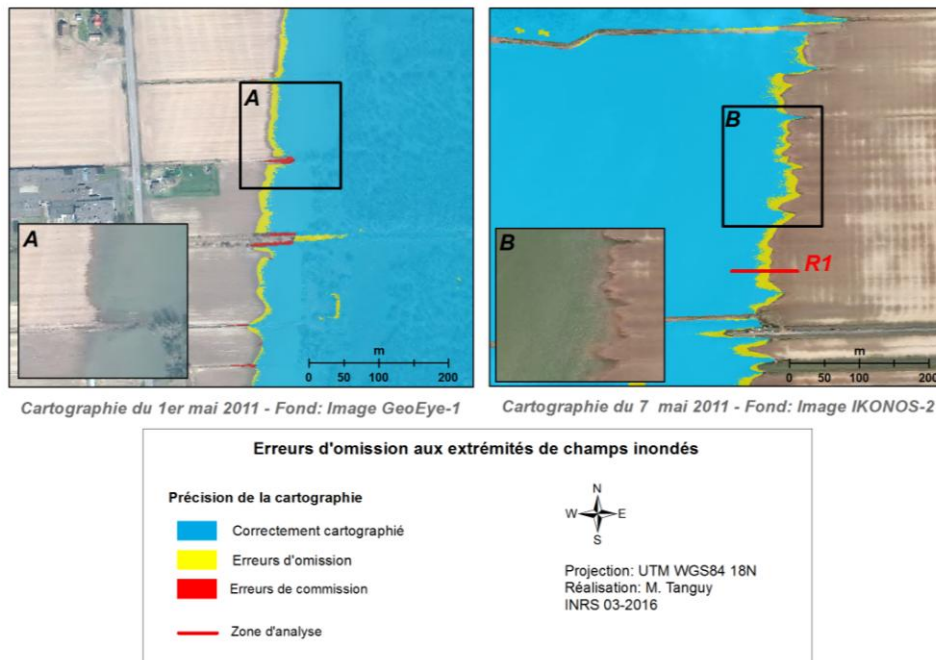


Figure 4.23: Localisation des zones d'erreurs d'omission aux extrémités de champs inondés

La présence de ces erreurs est en grande partie due à des imprécisions des données de validation. Comme on l'a déjà souligné dans la section 3.4.5, il n'a pas toujours été aisé de délimiter manuellement l'étendue maximale de la zone inondée aux extrémités des champs, la limite entre les sols non inondés mais saturés d'eau et les sols inondés n'étant pas claire. Pour valider cette hypothèse, mais aussi pour l'illustrer, les élévations du sol et des différentes surfaces d'eau ainsi que les intervalles de récurrence d'inondation ont été extraites dans plusieurs de ces zones. La Figure 4.24 et la Figure 4.25 présentent les résultats obtenus pour la zone *R1*, qui a été identifiée dans la Figure 4.23. Ces deux figures permettent de constater que les erreurs d'omission se situent dans une zone où les élévations des surfaces d'eau de récurrence ne présentent pas d'anomalies. L'augmentation importante des intervalles de récurrence d'inondation apparaît être liée à une augmentation des élévations du sol, qui est plus marquée que dans la zone inondée adjacente correctement identifiée. Ainsi, si on considère l'absence d'anomalies dans les élévations des différentes surfaces d'eau et les valeurs élevées d'intervalles de récurrence d'inondation, la probabilité que la zone identifiée comme contenant des erreurs d'omission ait été en réalité inondée est très faible. Cela tend à valider l'hypothèse que les erreurs d'omission sont dues à des imprécisions des données de validation. Cette analyse permet également d'écarter l'hypothèse d'une sous-estimation de l'intervalle de récurrence d'inondation extrait de la classe Eau libre.

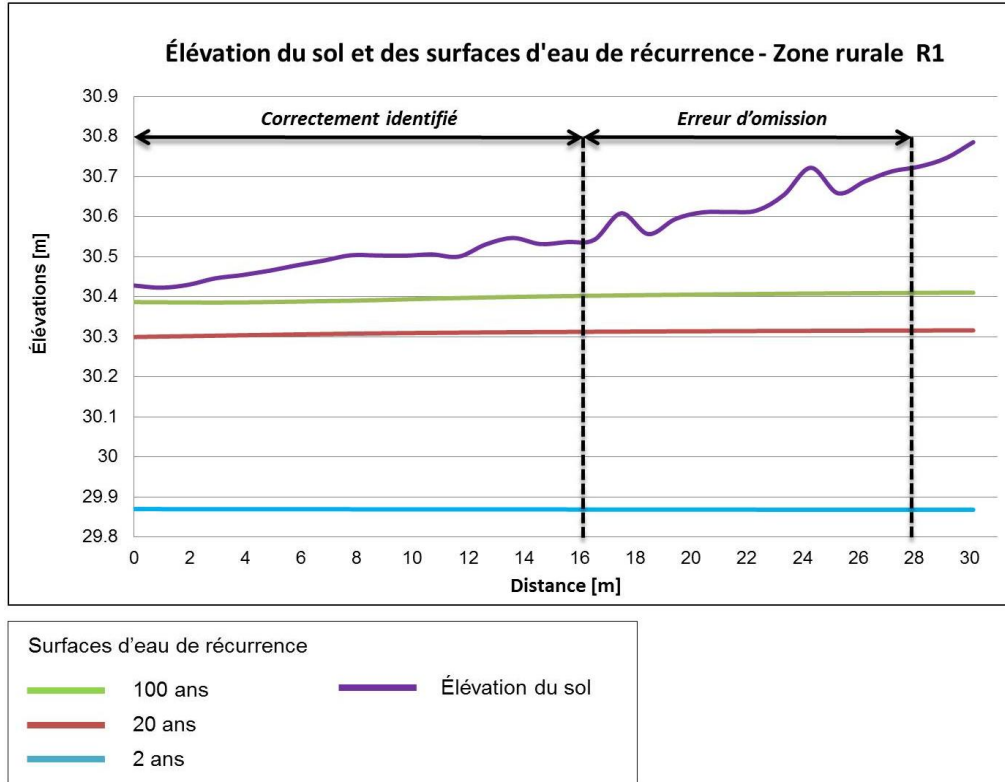


Figure 4.24: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence extraites d'une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation (Zone rurale R1)

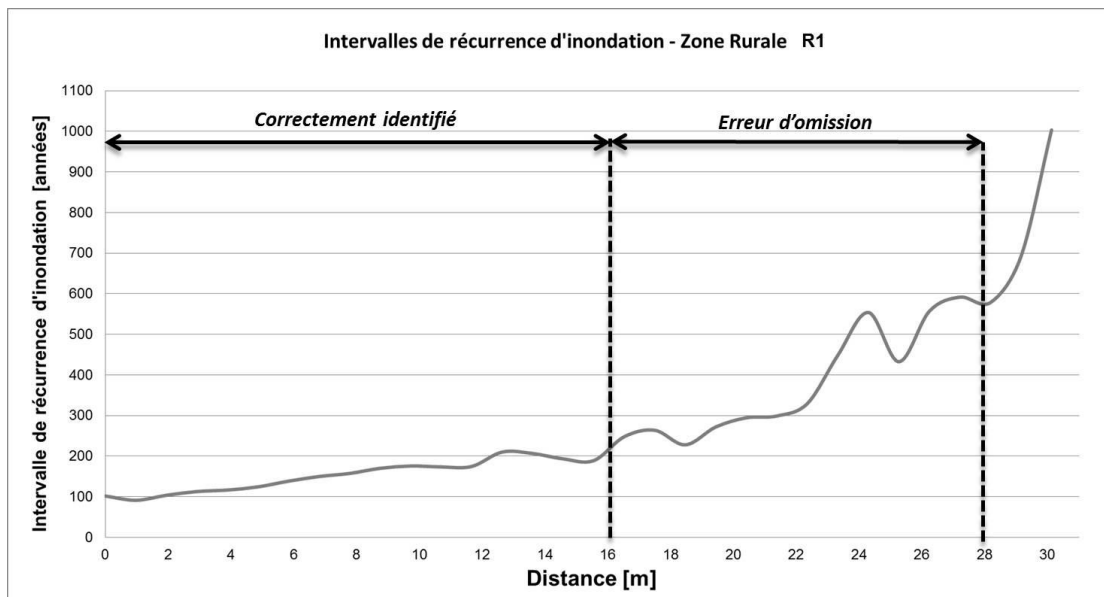


Figure 4.25: Intervalles de récurrence d'inondation extraits d'une surface présentant une sous-estimation de l'étendue de l'inondation (Zone rurale R1)

Enfin, pour la cartographie du 7 mai, la présence d'erreurs d'omission au milieu de certains champs semble également être le fait du vent soufflant du nord-ouest au moment de l'acquisition de l'image IKONOS-2 (Figure 4.26). Ce vent a eu pour effet de pousser l'eau en direction de l'est, et ainsi de submerger certaines surfaces qui n'auraient théoriquement pas dues être inondées. Afin d'illustrer ce phénomène, les élévations du sol ainsi que les intervalles de récurrence d'inondation ont été extraits dans une zone d'omission identifiée *R2* sur la cartographie du 7 mai, et située au centre d'un champ partiellement inondé (Figure 4.27 et Figure 4.28). L'analyse des valeurs d'élévation du sol dans cette zone d'omission a mis en relief une surélévation du sol de l'ordre de 10 à 15 cm, et une forte augmentation simultanée des intervalles de récurrence d'inondation. Ces augmentations suggèrent ainsi que cette zone n'aurait en effet pas due être recouverte par les eaux d'inondation. L'action du vent n'étant généralement pas limitée à une zone restreinte, il est également probable qu'il soit à la source de certaines erreurs d'omission situées aux extrémités des champs à l'est du chenal de la rivière.

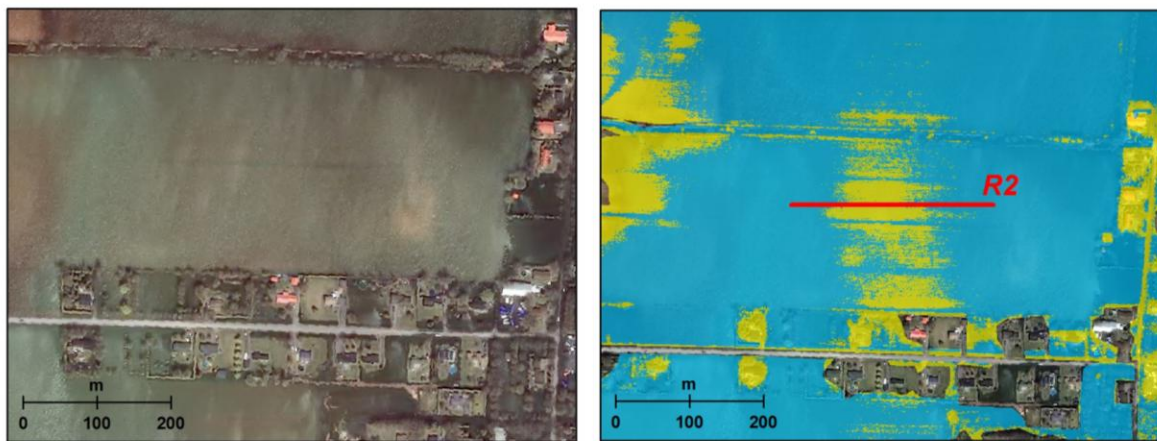


Image IKONOS-2, 8 mai 2011

Cartographie des zones inondées, 7 mai 2011

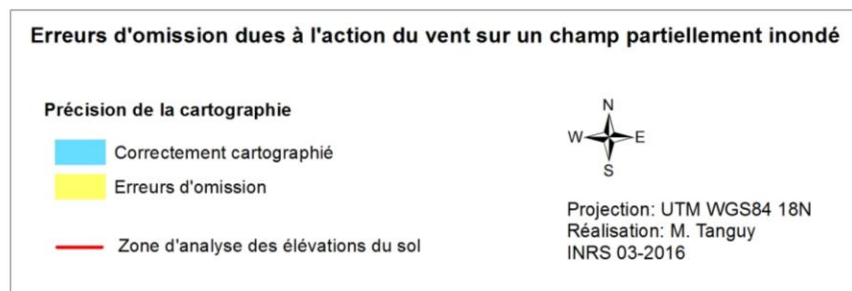


Figure 4.26: Localisation d'erreurs d'omission dues à l'action du vent dans un champ partiellement inondé

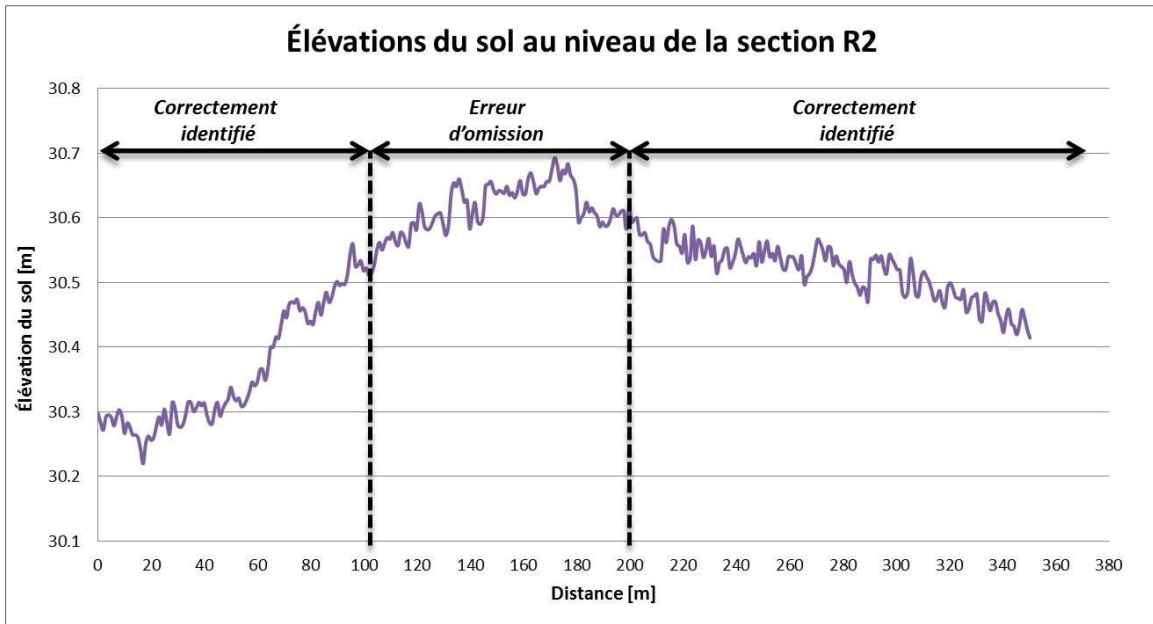


Figure 4.27: Élévations du sol pour une zone d'omission située au milieu d'un champ partiellement inondé

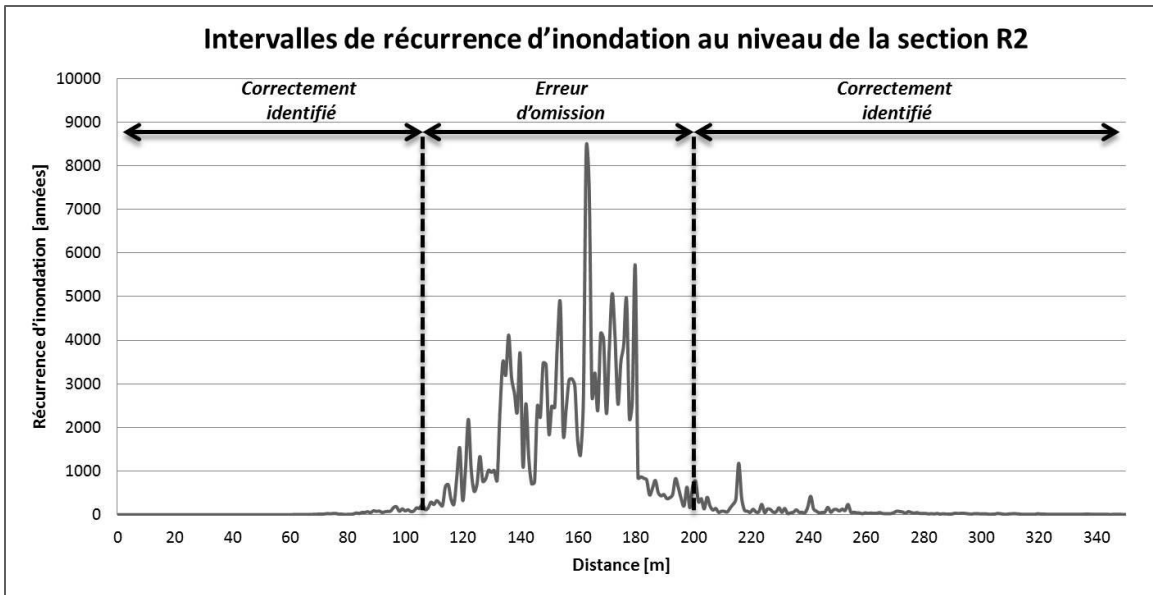


Figure 4.28: Intervalles de récurrence d'inondation d'une zone d'erreur d'omission au centre d'un champ partiellement inondé

4.2.2 Analyse des erreurs de surestimation de l'étendue de l'inondation

La Tableau 4.4 a permis de souligner le taux élevé (35%) d'erreurs de commission dans la cartographie des zones urbaines et rurales inondées du 1^{er} mai 2011. Une très grande partie de ces erreurs de commission est située dans un seul et unique champ entouré d'un talus, situé à l'extrême sud de la zone d'étude du 1^{er} mai. Ce talus était déjà présent en 2006, puisqu'il est intégré dans la délimitation des différentes plaines inondable de récurrence (Figure 4.29). A lui seul, ce champ non inondé représente près de 88% du total des erreurs de commission pour cette date.

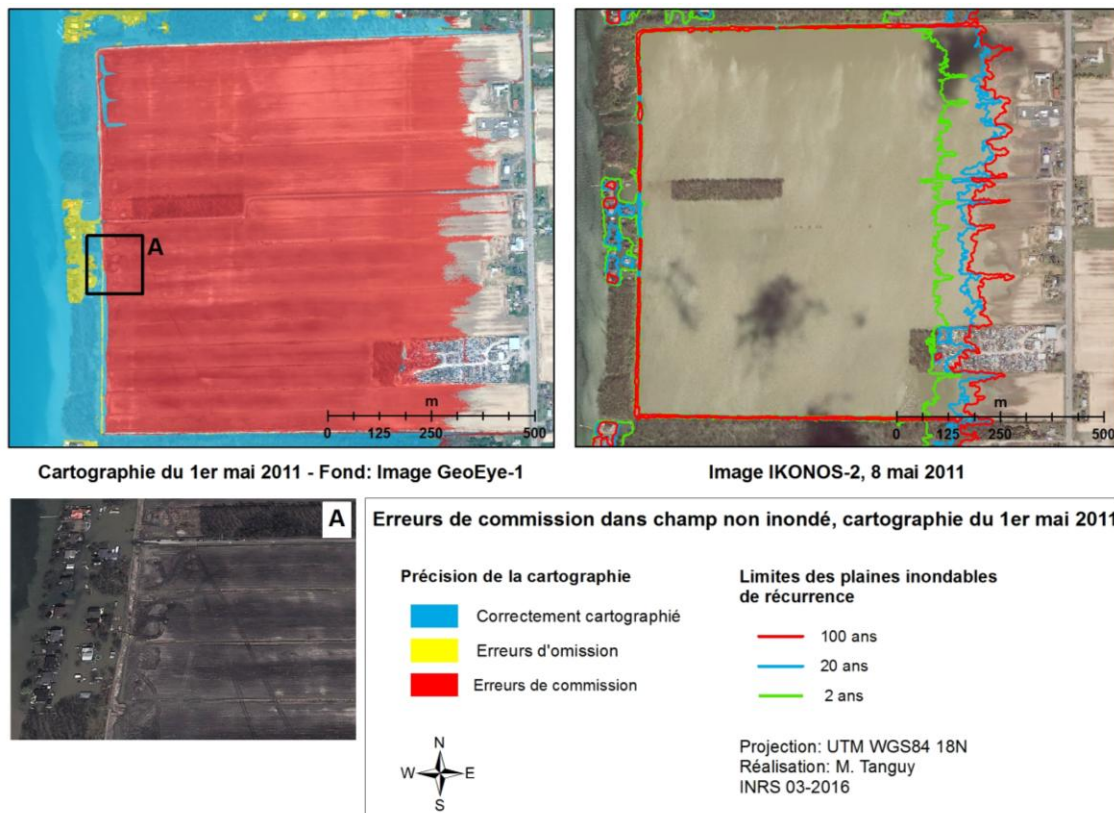


Figure 4.29: Localisation d'une zone majeure d'erreur de commission dans un champ non inondé, pour la cartographie du 1^{er} mai 2011

Considérant que la limite de la plaine inondable de récurrence 2 ans est située au milieu de ce champ et que l'image GeoEye-1 permet de voir très clairement que les autres surfaces autour de ce champ sont inondées, il est légitime de considérer que ce champ devrait lui aussi être en

très grande partie inondé le 1^{er} mai. L'image IKONOS-2 montre d'ailleurs que 7 jours plus tard, le champ était presque entièrement envahi par l'eau. Dans ce second cas, la méthode a permis de déterminer avec précision la limite de l'inondation dans le champ.

Une analyse visuelle approfondie de l'image GeoEye-1 a révélé qu'au moment de l'acquisition de l'image, des travaux étaient en cours sur la partie du talus la plus proche de la rivière. On aperçoit clairement les traces d'engins de chantier dans le champ ainsi qu'un des engins en question (Figure 4.29, panneau A). Il est donc très probable que des modifications de l'élévation du talus aient eu lieu avant ou au cours de l'inondation. Ces modifications ont eu un impact sur l'écoulement de l'eau, puisqu'elles ont permis de retenir son avancée dans le champ. Le fait que des travaux étaient en cours le 1^{er} mai 2011, alors que l'inondation se trouvait dans une phase ascendante, permet de supposer que ces travaux visaient à protéger le champ et éventuellement la route qui le traverse, et qui constitue le seul accès à la zone résidentielle inondée située derrière le talus, entre le champ et la rivière. Cependant, ces efforts de mitigation ne semblent pas avoir résisté à la montée des eaux qui a eu lieu entre le 1^{er} mai et le 8 mai.

Ce cas particulier met en relief une des limites de la méthode de cartographie des zones inondées qui est ici présentée. Le fait que les données d'intervalles de récurrence d'inondation soient estimées à partir de limites de plaines inondables de récurrence et de données d'élévation définies ou acquises parfois plusieurs années avant l'évènement d'inondation ne permet pas de tenir compte des modifications locales de l'élévation du sol et des développements humains récents, qui ont un impact sur l'écoulement de l'eau au cours d'une inondation. L'exemple qui vient d'être présenté a montré que de telles modifications peuvent mener à d'importantes erreurs dans la cartographie des zones inondées. De la même manière, il est évident que les effets des protections temporaires contre l'avancée des eaux en milieu urbain, tels que la pose de sacs de sables, l'installation de barrages mobiles ou encore de pompes, ne peuvent être pris en compte par la méthode. Leur impact sur l'étendue de l'inondation est très restreint, mais ils peuvent quand même produire des surestimations locales de l'étendue de l'inondation.

Pour le cas d'étude du 7 mai, les erreurs de commission sont très faibles en zone rurales (elles se chiffrent à 3% seulement) et se situent exclusivement aux extrémités de certains champs inondés. Elles prennent le plus souvent la forme de petites bandes d'une dizaine de mètres au maximum aux extrémités des champs ou dans les fossés bordant les routes. Dans quelques rares cas, elles s'étendent sur une largeur atteignant jusqu'à une cinquantaine de mètres (Figure 4.30). Si le cas du champ non inondé précédemment mentionné est omis, les erreurs de

commission en milieu rural prennent une forme identique sur la cartographie des zones inondées du 1^{er} mai. En zone urbaine, les erreurs de commission, estimées à 13% pour la cartographie du 1^{er} mai et à 14% pour la cartographie du 7 mai, ont également des formes similaires pour les deux dates. Elles se trouvent aux extrémités des zones inondées, le plus souvent au niveau de terrains habités, mais aussi au niveau de rues (Figure 4.30).

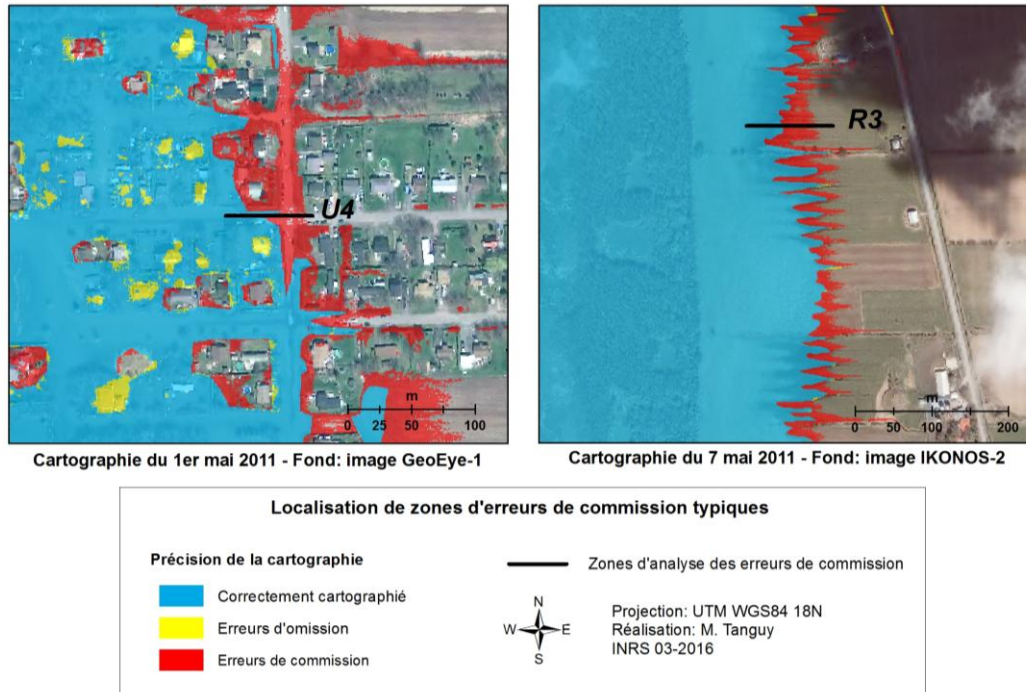


Figure 4.30: Localisation de zones d'erreurs de commission typiques en zones urbaines et rurales

Pour les zones urbaines comme pour les zones rurales, une partie de ces erreurs de commission peut une nouvelle fois s'expliquer par des imprécisions des données de validation. Comme souligné à plusieurs reprises, la limite exacte de l'inondation a été souvent difficile à déterminer à l'intérieur des parcelles habitées, ainsi qu'aux extrémités de certains champs inondés et sous la végétation bordant certains champs. Cependant, il est évident que ces imprécisions n'expliquent pas l'ensemble des erreurs de commission. La Figure 4.30 montre très clairement que des zones non inondées ont en effet été cartographiées comme inondées sur les images optiques de très haute résolution spatiale.

Les valeurs des élévations des différentes surfaces d'eau de récurrence et du sol ainsi que des intervalles de récurrence d'inondation ont été analysées dans plusieurs zones urbaines et rurales où l'étendue de l'inondation a été surestimée. Les Figure 4.31 et Figure 4.32 présentent un exemple de résultats obtenus dans une zone d'erreurs de commission en milieu urbain, identifiée *U4* sur la Figure 4.30. Les Figures 4.33 et 4.34 présentent ceux obtenus dans une zone d'erreurs de commission en milieu rural, et identifiée *R3* sur la Figure 4.30.

Cette analyse a permis de constater que les zones où l'étendue de l'inondation est surestimée se situent à des endroits où les élévations du sol varient peu par rapport aux surfaces inondées adjacentes correctement cartographiées. De plus, l'élévation du sol dans ces endroits reste proche des élévations de la surface d'eau de récurrence 100 ans. Les intervalles de récurrence d'inondation de ces zones de surestimation ne présentent donc pas de variations significatives par rapport aux surfaces inondées adjacentes correctement identifiées, et restent situées dans une gamme de valeurs dépassant rarement les 250 ans. Une surestimation de quelques années seulement de l'intervalle de récurrence d'inondation extrait des objets de la classe Eau libre peut ainsi entraîner une surestimation importante de l'étendue de l'inondation dans certaines zones. Cela peut poser problème dans une plaine inondable où les élévations du sol varient peu, telle que celle de la rivière Richelieu.

Ainsi, la méthode d'extraction des intervalles de récurrence d'inondation des objets appartenant à la classe Eau libre tend à surestimer légèrement les intervalles de récurrence d'inondation. Il conviendrait ainsi de modifier le percentile utilisé pour extraire l'intervalle de récurrence d'inondation de la classe Eau libre. Cela ne peut cependant se faire qu'à l'aide d'une analyse par essais et erreurs, aboutissant à la sélection d'une valeur appropriée pour le cas d'étude ici présenté, mais dont la validité n'est pas garantie pour d'autres zones d'étude. Si ce point doit être considéré, la surestimation de l'étendue de l'inondation reste modérée et ne devrait pas constituer une limite majeure à l'utilisation de la méthode de manière opérationnelle.

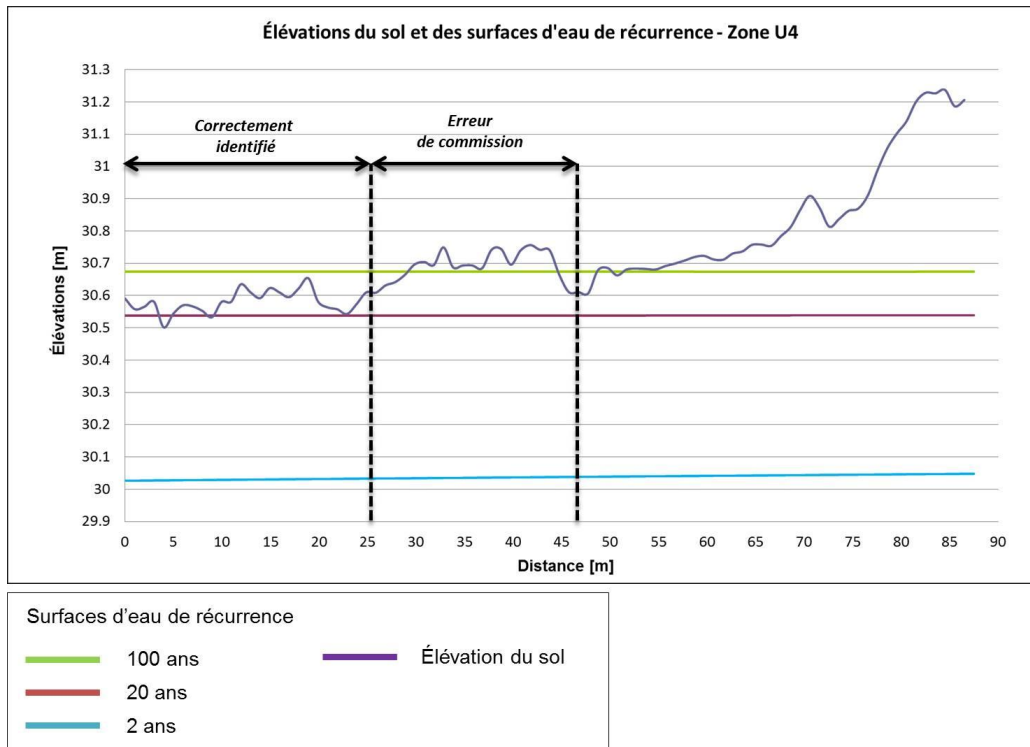


Figure 4.31: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone urbaine (Zone U4)

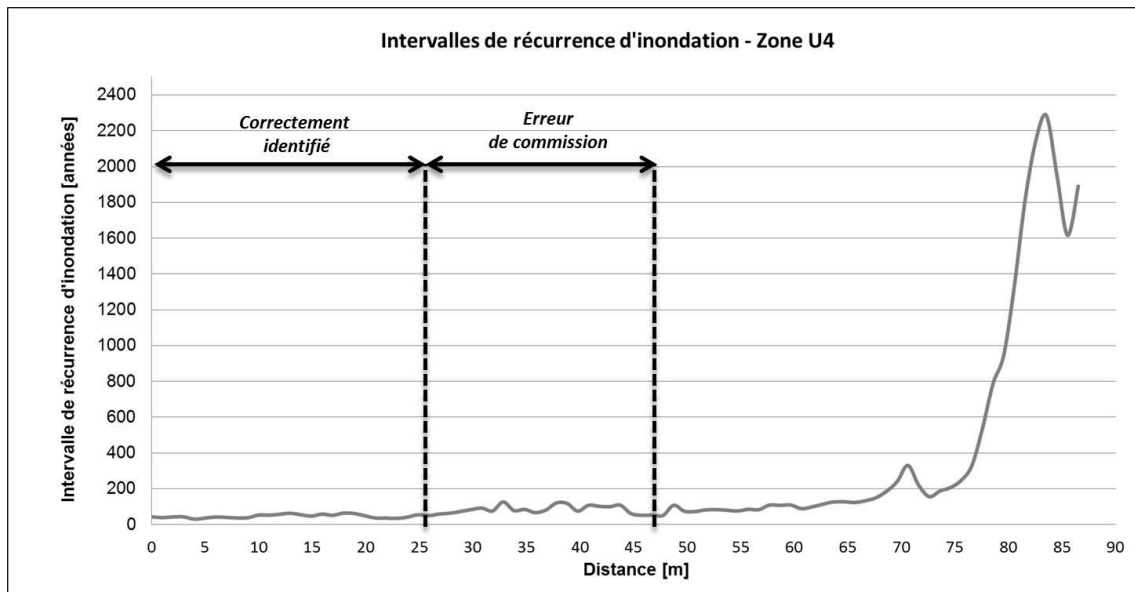


Figure 4.32: Intervalles de récurrence d'inondation pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone urbaine (Zone U4)

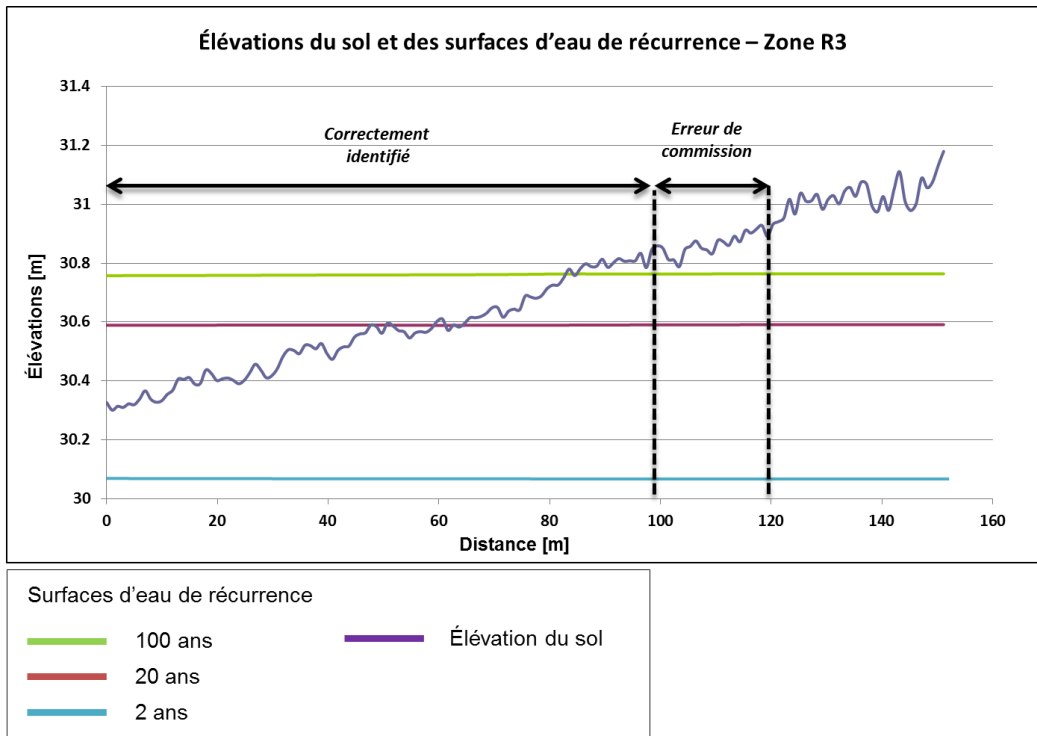


Figure 4.33: Élévations du sol et des surfaces d'eau de récurrence pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone rurale (Zone R3)

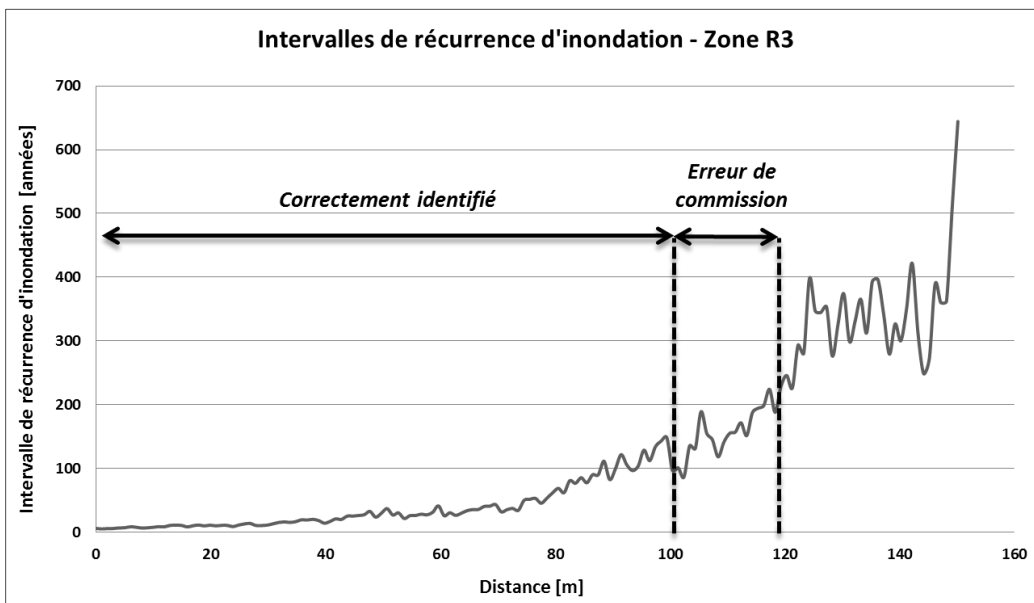


Figure 4.34: Intervalles de récurrence d'inondation pour une surface présentant une surestimation de l'étendue de l'inondation en zone rurale (Zone R3)

4.3 Avantages et limites de la méthode proposée

Au cours des sections précédentes, la précision de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées a été analysée, et les sources de surestimation et de sous-estimation de l'étendue des zones inondées ont été largement détaillées. Malgré ces erreurs, dont l'emprise spatiale reste le plus souvent modérée, la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées a permis l'identification du statut d'inondation de la majorité des pixels contenus dans les zones d'intérêt, et cela pour les deux cas étudiés. Les zones touchées par l'inondation peuvent ainsi être aisément identifiées grâce aux cartes générées, de même que les bâtiments touchés ou entourés d'eau, et les segments de route inondés. Les résultats présentés soulignent ainsi la pertinence de l'approche développée et l'intérêt réel de l'utilisation combinée de l'imagerie RSO et des données d'intervalles de récurrence d'inondation, estimées en tout point de la plaine inondable.

Ces résultats montrent également que l'approche proposée rivalise en matière de précision avec les algorithmes existants les plus performants. A notre connaissance, la méthode ayant jusqu'à présent produit les résultats les plus précis a été présentée par Giustarini *et al.* (2013) (voir section 2.3.7). Environ 82% des pixels urbains inondés ont été correctement identifiés sur l'image TerraSAR-X d'inondation en polarisation HH utilisée pour tester la méthode. Les sous-détections et les sur-détections s'élèvent à 3% et à 16%, respectivement. L'approche proposée se limite cependant aux zones urbaines, et les zones rurales ne sont pas considérées. S'il est vrai que l'intérêt de la cartographie des zones inondées est plus important en zone urbaine du fait de la présence d'un plus grand nombre d'individus et d'infrastructures, ne pas tenir compte des zones rurales peut constituer une limite importante pour l'intervention en situation d'inondation. En effet, dans un cas comme celui de la rivière Richelieu, dont le mode d'occupation du sol peut être considéré comme représentatif d'un grand nombre de bassins versants au Québec, des zones résidentielles de petite taille mais aussi des chalets sont situés en zone rurale, directement sur le bord de la rivière. Les individus et les infrastructures présents dans ces zones sont ainsi fortement exposés à l'aléa. De nombreuses routes et des chemins d'accès aux résidences sont également présents en zone rurale. Leur inondation peut résulter en l'isolement de la population, ce qui, en phase d'intervention, nécessite la mise en place de mesures d'évacuation.

La méthode ayant permis, à notre connaissance, d'obtenir la détection la plus précise des zones rurales inondées a été présentée par Mason *et al.* (2012b). Cette méthode a permis de détecter

avec précision 89% des pixels inondés en zone rurale sur une image TerraSAR-X, avec un taux d'erreurs de commission de 6%. La précision de la détection en zone urbaine est cependant significativement moins élevée, avec 75% des pixels inondés correctement détectés et un taux d'erreurs de commission de 24%. Il est uniquement fait état de la précision de la détection des zones d'eau libre, et pas, par exemple, de la détection des eaux d'inondation dans les zones de végétation.

Les méthodes présentées par Mason *et al.* (2012b) et par Giustarini *et al.* (2013) proposent de minimiser le risque de surestimation de l'étendue de l'inondation en masquant les zones affectées par les effets d'ombre et de déversement (Mason *et al.*, 2012b) et les surfaces artificielles ayant une rétrodiffusion de type spéculaire (Giustarini *et al.*, 2013), au cours des opérations de traitement en temps réel des images RSO d'inondation. Dans les deux cas, le masque de ces zones représente une partie non négligeable de la zone d'étude (39% et ~20%, respectivement), ce qui signifie que le statut d'inondation n'est pas identifié pour une partie non négligeable des zones urbaines. A l'inverse, il a été ici démontré que les intervalles de récurrence d'inondation permettent de supprimer les surestimations de la présence d'eau libre dues à ces effets, ce qui rend inutile l'utilisation de tels masques. De plus, la méthode ne cherche pas à détecter la présence des pixels inondés en milieu urbain, mais déduit leur présence à l'aide de données à caractère hydraulique. Ainsi, tous les pixels contenus dans la zone d'étude sont intégrés dans la cartographie des zones urbaines et rurales inondées.

Cependant, et c'est un point important, la méthode n'a été testée pour le moment que sur la rivière Richelieu, qui présente une forme très linéaire et une occupation du sol facilitant la détection de l'eau libre. La limite des zones inondées en eau libre se trouve en effet dans des zones dégagées, comme des champs encore non cultivés, et pas uniquement sous de la végétation ou entre des bâtiments en zone urbaine. Tester cette méthode à l'aide d'images relatives à d'autres phénomènes d'inondation serait donc pertinent, afin de valider son large potentiel d'utilisation.

De plus, cette méthode présente une limite importante : elle ne peut s'appliquer qu'à un type d'inondation, à savoir les inondations fluviales en eau libre. Les limites des plaines inondables de récurrence utilisées pour la production de la carte des intervalles de récurrence tiennent en effet uniquement compte de l'hydrodynamique fluviale en eau libre. L'effet de la présence de glaces de rivière sur l'hydrodynamique du cours d'eau n'est ainsi pas intégré dans ces données. Il n'existe d'ailleurs à ce jour aucune méthode permettant de délimiter avec précision les plaines inondables de récurrence pour les inondations par embâcles de glace de rivière, et pouvant être

appliquée à l'ensemble des rivières soumises à ces phénomènes. La méthode proposée présente donc un désavantage majeur pour un environnement nordique comme celui du Canada, où près de 70% des inondations se produisent à la suite de phénomènes d'embâcles et de débâcles de glace de rivière (Beltaos, 1995). Pour les mêmes raisons, la méthode ne peut pas être appliquée dans des situations d'inondation éclair ou subite, d'inondations par rupture d'ouvrages ou encore par remontées de nappes phréatiques.

Dans un environnement nordique comme celui du Québec, la présence de neige humide sur les images RSO d'inondation pourrait être la source d'erreurs d'estimation de l'étendue de l'inondation. La neige humide absorbe en effet une très grande partie du rayonnement électromagnétique et ne génère donc que de très faibles valeurs de rétrodiffusion (Pierdicca *et al.*, 2013; Scherer *et al.*, 2005). Les zones recouvertes de neige humide peuvent ainsi être aisément confondues avec de l'eau libre, ce qui pourrait entraîner une surestimation de la présence d'objets d'eau libre. La suppression de ces objets de la classification de l'Eau libre à l'aide de leurs degrés d'appartenance à cette classe pourrait s'avérer inefficace, leur faible valeur de rétrodiffusion leur conférant un degré élevé d'appartenance à la classe Eau libre. De plus, si les surfaces recouvertes de neige humide sont nombreuses et étendues, ou situées à proximité de la rivière, l'impact de la seconde étape de raffinement de la classification à l'aide des intervalles de récurrence d'inondation pourrait également être limité. L'étendue de l'inondation pourrait ainsi être largement surestimée. Faute d'image RSO appropriée, ces hypothèses n'ont cependant pas pu être confirmées.

Enfin, la nécessité d'estimer les données d'intervalles de récurrence d'inondation à partir de limites de plaines inondables de récurrence et de données d'élévation les plus à jour possible peut également représenter une limite. Ces données ne sont en effet pas mises à jour sur une base régulière, et cela en raison des coûts souvent élevés nécessaires à leur production.

4.4 Estimation des hauteurs d'eau dans les zones urbaines et rurales inondées

Cette dernière sous-section présente les résultats de l'estimation des hauteurs d'eau en tout point des zones urbaines et rurales inondées au moment de l'acquisition de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin, le 1^{er} mai 2011. Ces résultats sont présentés à la Figure 4.35 pour une section de zone urbaine, pour laquelle des données de validation des hauteurs d'eau sont disponibles

(voir section 3.4.5). On trouvera également en Annexe III (Figure A4.1) la carte des hauteurs d'eau estimées pour l'ensemble de la zone d'étude, soit une portion de 23 km de la rivière Richelieu.

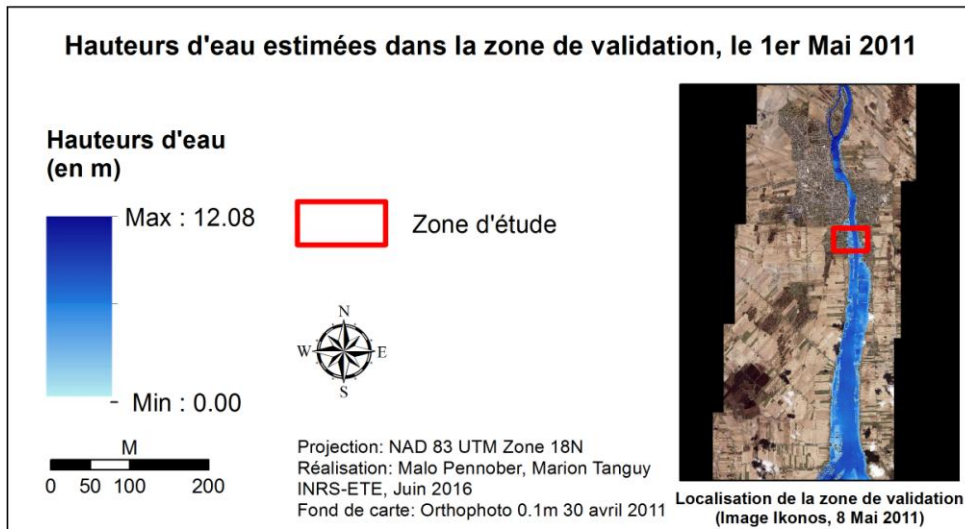
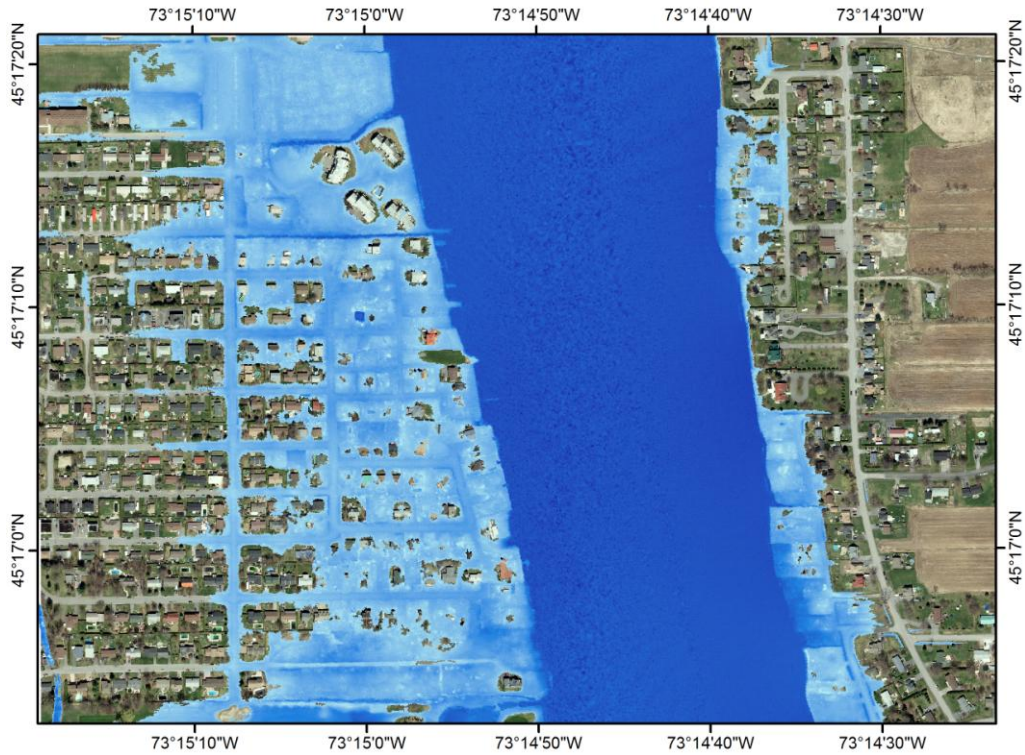


Figure 4.35: Hauteurs d'eau estimées dans la zone de validation, le 1er mai 2011

4.4.1 Précision des estimations des hauteurs d'eau en zone inondée

Afin d'apprécier l'évolution spatiale des hauteurs d'eau dans la zone inondée, celles-ci ont été extraites dans une zone d'environ 170 m de longueur, traversant une partie de la rivière Richelieu, des bâtiments et une rue. La zone d'analyse ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.36.

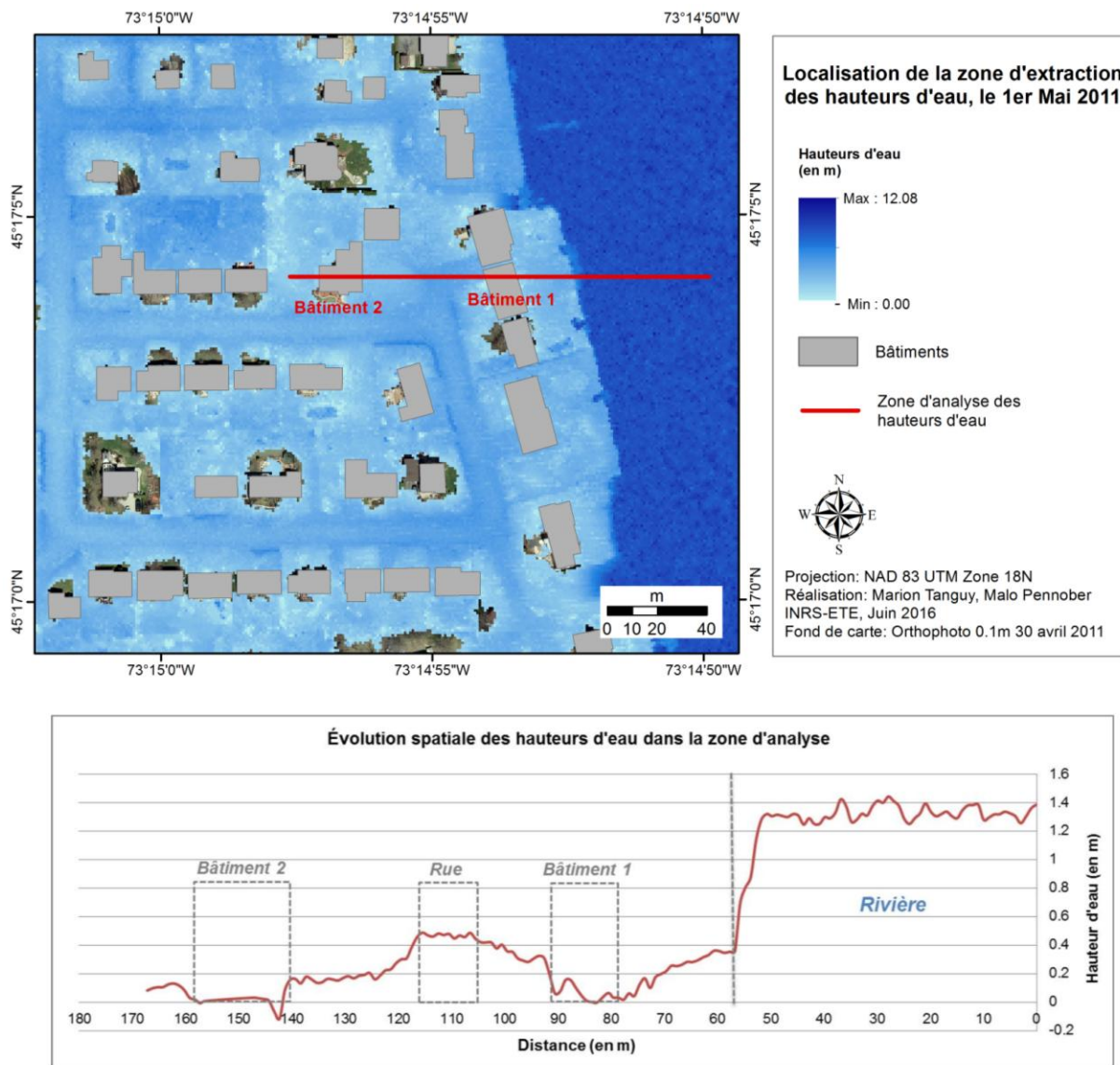


Figure 4.36: Analyse de l'évolution spatiale des hauteurs d'eau pour une section de la zone de validation. Les hauteurs d'eau sont nettement plus élevées au niveau de la rivière, puis diminuent de manière significative sur la portion terrestre de la zone inondée. Elles diminuent ensuite de manière importante mais progressive autour des bâtiments 1 et 2.

L'analyse des valeurs extraites dans cette section de la zone de validation montre la pertinence de l'évolution spatiale des hauteurs d'eau. Celles-ci sont nettement plus élevées au niveau de la rivière, puis diminuent de manière significative sur la portion terrestre de la zone inondée. Les hauteurs d'eau diminuent de manière importante mais progressive autour des bâtiments 1 et 2, pour finalement ne conserver que des valeurs très peu élevées. Cette diminution des hauteurs d'eau autour du bâtiment est due à une augmentation de l'élévation du sol, comme on l'a déjà noté et discuté dans la section 4.2.1. La rue située entre ces deux bâtiments ayant une élévation légèrement inférieure à celles des terrains entourant les bâtiments, les hauteurs d'eau y sont plus élevées. Les hauteurs d'eau au niveau de la rivière ne sont pas constantes et présentent des variations d'une quinzaine de centimètres. Ces variations peuvent être dues à la précision altimétrique de ± 15 cm des points LIDAR utilisés pour générer le MNT de la zone d'étude ou éventuellement au fait que la surface de l'eau était affectée par des vagues au moment de l'acquisition des données LIDAR.

Afin d'estimer la précision des hauteurs d'eau au 1^{er} Mai 2011, ces résultats ont été comparés aux données de validation générées à partir d'une orthophotographie des zones inondées acquise le 30 avril 2011 (voir section 3.4.5). Ces données de validation peuvent contenir des erreurs, principalement dues au fait que la surface d'eau de validation a été générée à l'aide d'une méthode d'interpolation. Les hauteurs d'eau obtenues grâce à cette surface d'eau ne sont ainsi que des estimations, basées sur la position et sur la valeur des points cotés renseignés en entrée. Les données LIDAR utilisées pour générer le MNT de la zone d'étude, et à partir desquelles les élévations aux limites des zones inondées identifiées sur l'orthophotographie sont extraites, ont de plus une imprécision verticale estimée à ± 15 cm. Enfin, on doit souligner que la méthode d'interpolation utilisée, qui cherche à créer une surface lisse et non affectée par des sommets et des dépressions (voir section 3.2) n'est guidée que par les valeurs d'élévation des points renseignés en entrée. Il ne lui est donc pas possible de tenir compte des variations à petite échelle des élévations de la surface d'eau dans les zones éloignées des points utilisés en entrée.

Enfin, nous sommes conscients qu'utiliser une méthode identique pour générer les données de validation des hauteurs d'eau et pour estimer les hauteurs d'eau au 1^{er} mai 2011 risque de minimiser les erreurs d'estimation des hauteurs d'eau pour cette date. Les différences entre les hauteurs d'eau de validation et les hauteurs d'eau estimées devraient ainsi provenir des différences de positionnement des points matérialisant la limite de la zone inondée sur les deux jeux de données et utilisés pour l'interpolation des surfaces d'eau. Cet aspect doit être pris en

compte lors de l'analyse des résultats de la précision des estimations des hauteurs d'eau, présentée ci-dessous.

Afin d'analyser la précision des estimations des hauteurs d'eau dans la zone test, trois critères de performance numériques ont été utilisés: la racine de l'erreur quadratique moyenne (ou RMSE pour *Root Mean Square Error*), l'erreur moyenne et enfin la déviation standard. Ces différents critères de performance statistique sont ceux les plus fréquemment utilisés pour l'analyse de la précision des hauteurs d'eau obtenues dans les travaux utilisant la fusion de données de télédétection et de données d'élévation (Schumann *et al.*, 2011).

La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée comme la racine carrée de la moyenne des différences au carré entre les hauteurs d'eau simulées et les hauteurs d'eau de validation. Le RMSE permet d'obtenir une évaluation globale de l'erreur d'estimation des hauteurs d'eau sur l'ensemble de la zone analysée. Il est estimé à l'aide de l'Équation 15 :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{est}^i - H_{val}^i)^2}{N}} \quad (15)$$

Où: N est la taille de l'échantillon

H_{est}^i est la hauteur d'eau estimée

H_{val}^i est la hauteur d'eau de validation

L'erreur moyenne (notée ME) représente la moyenne des différences entre les hauteurs d'eau simulées et les hauteurs d'eau de validation. Elle permet de déterminer le sens de l'erreur, c'est-à-dire la tendance à la sous ou à la surestimation des hauteurs d'eau simulées par rapport aux données de validation, et de quantifier cette erreur.

L'erreur moyenne est estimée à l'aide de l'Équation 16 :

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{est}^i - H_{val}^i)}{N} \quad (16)$$

L'écart-type (noté σ) est une mesure de la dispersion d'une série de mesures autour de la moyenne. L'écart-type de l'erreur permet donc de déterminer si les différences entre les hauteurs d'eau estimées et les hauteurs d'eau de validation sont largement dispersées autour de la moyenne des différences ou non. L'écart-type de l'erreur est estimé à l'aide de l'Équation 17.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{diff}^i - \bar{H}_{diff})^2}{N - 1}} \quad (17)$$

Où: N est la taille de l'échantillon

H_{diff}^i est la différence entre la hauteur d'eau estimée et la hauteur d'eau de validation, soit $(H_{est}^i - H_{val}^i)$

\bar{H}_{diff} est la moyenne des différences définies ci-avant

Le Tableau 4.5 présente les résultats des analyses statistiques réalisées entre les données de hauteurs d'eau estimées et les données de validation des hauteurs d'eau. Les valeurs de la différence minimale (notée DH_{min}) et de la différence maximale (notée DH_{max}) entre les données estimées et les données de validation sont également renseignées, afin d'offrir une comparaison de leurs valeurs avec celles des 5^{ème} (q_{05}) et 95^{ème} (q_{95}) percentiles de la distribution des différences de hauteur d'eau entre les données estimées et les données de validation.

Tableau 4.5: Résultats des analyses statistiques de précision des estimations des hauteurs d'eau, en cm

<i>RMSE</i>	<i>ME</i>	σ	q_{05}	q_{95}	DH_{min}	DH_{max}
8	5	7	-6	18	-43	88

Les résultats de ces différentes analyses statistiques montrent que les erreurs d'estimation des hauteurs d'eau dans la zone d'étude sont faibles. La racine de l'erreur quadratique moyenne est

en effet de 8 cm sur l'ensemble de la zone, ce qu'on peut considérer comme faible. Cette erreur est de plus inférieure à l'incertitude altimétrique des données LIDAR utilisées pour créer le MNT de la zone d'étude, estimée à ± 15 cm. L'erreur moyenne est également faible et montre une légère tendance à la surestimation des hauteurs d'eau, à savoir de 5 cm. Enfin, la valeur de l'écart-type montre que la dispersion des erreurs autour de la moyenne des différences de hauteur d'eau entre données estimées et données de validation est modérée, puisqu'elle est de 7 cm. Cela pourrait paraître étonnant étant donné que la gamme de différences de hauteurs d'eau entre les données estimées et les données de validation s'étend sur 1,37 m. Cependant, les valeurs du 5^{ème} et du 95^{ème} percentile de la distribution des différences de hauteurs d'eau entre les deux jeux de données sont de -6 cm et de 18 cm, respectivement, alors que DH_{min} présente une valeur de -43 cm et DH_{max} une valeur de 88 cm. Cela montre donc que les erreurs élevées d'estimation des hauteurs d'eau le 1^{er} mai sont peu nombreuses et représentent ainsi des surfaces restreintes.

Afin de compléter cette analyse statistique de la précision des hauteurs d'eau, une carte représentant la répartition spatiale des différences entre les hauteurs d'eau estimées pour le 1^{er} mai et les hauteurs d'eau de validation a également été produite. Cette carte, qui est présentée à la Figure 4.37, permet de localiser les zones où les différences de hauteurs d'eau entre données estimées et données de validation sont les plus importantes. Pour faciliter la lecture de cette carte, ces différences ont été présentées en 4 classes, définies à l'aide des valeurs des 5^{ème} et 95^{ème} percentiles de la distribution des différences de hauteur d'eau et de l'erreur moyenne (ME). Le pourcentage de l'aire totale de la zone inondée représentée par chacune de ces 4 classes est donné au Tableau 4.6.

Tableau 4.6: Pourcentage de l'aire totale de la zone inondée par classe de différences de hauteurs d'eau

Classe	Pourcentage de l'aire totale
-43 cm à -6 cm	5%
-6 cm à 5 cm	44%
5 cm à 18 cm	46%
18 cm à 88 cm	5%

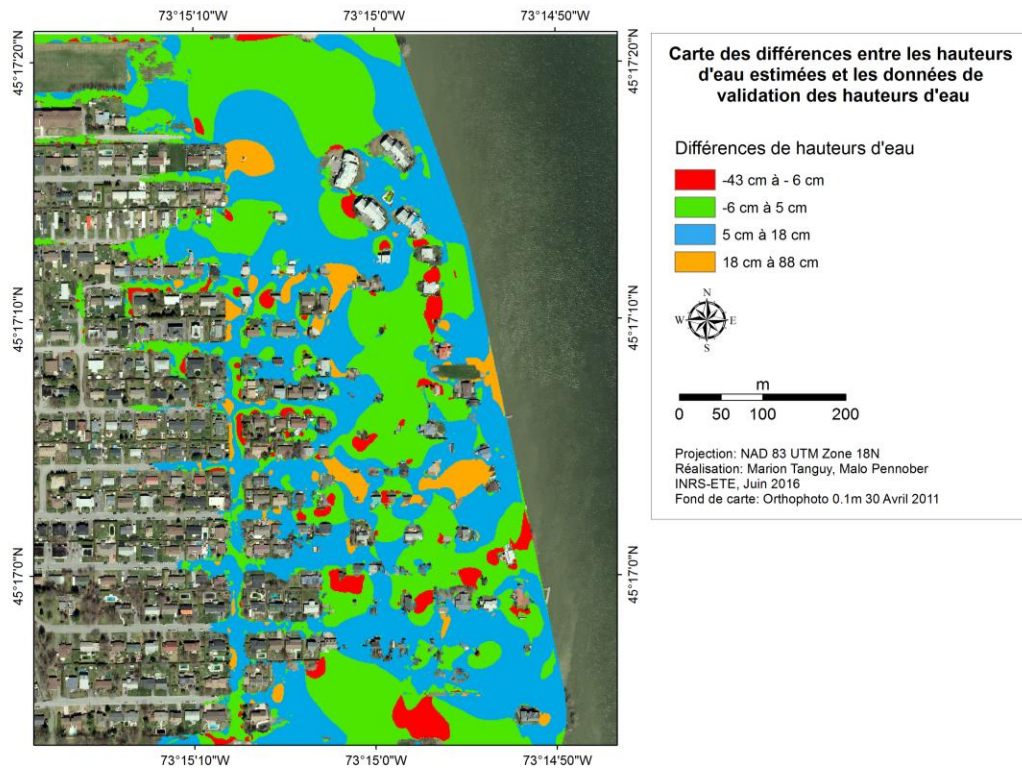


Figure 4.37: Carte des différences entre les hauteurs d'eau estimées pour le 1^{er} mai et les données de validation

La Figure 4.37 montre que les zones présentant une sous-estimation des hauteurs d'eau comprise entre -43 cm et -6 cm (en rouge sur la figure), sont peu étendues et restent localisées. Les quelques zones présentant de telles sous-estimations se retrouvent en grande majorité au niveau de bâtiments, où des points matérialisant la limite de la zone inondée identifiée manuellement sur l'orthophotographie du 30 avril se trouvent à des élévations nettement supérieures à celles des points matérialisant la limite des zones inondées le 1^{er} mai. La Figure 4.38(a) illustre ce phénomène. Même si la distance entre les deux limites de zones inondées est restreinte, cela peut dans certains entraîner la création de points ayant des élévations différentes de plusieurs dizaines de centimètres. La surface d'eau générée par l'interpolation spatiale de la valeur de ces points pour la date du 1^{er} mai présente donc des élévations plus faibles que celles de la surface d'eau générée pour le 30 avril.

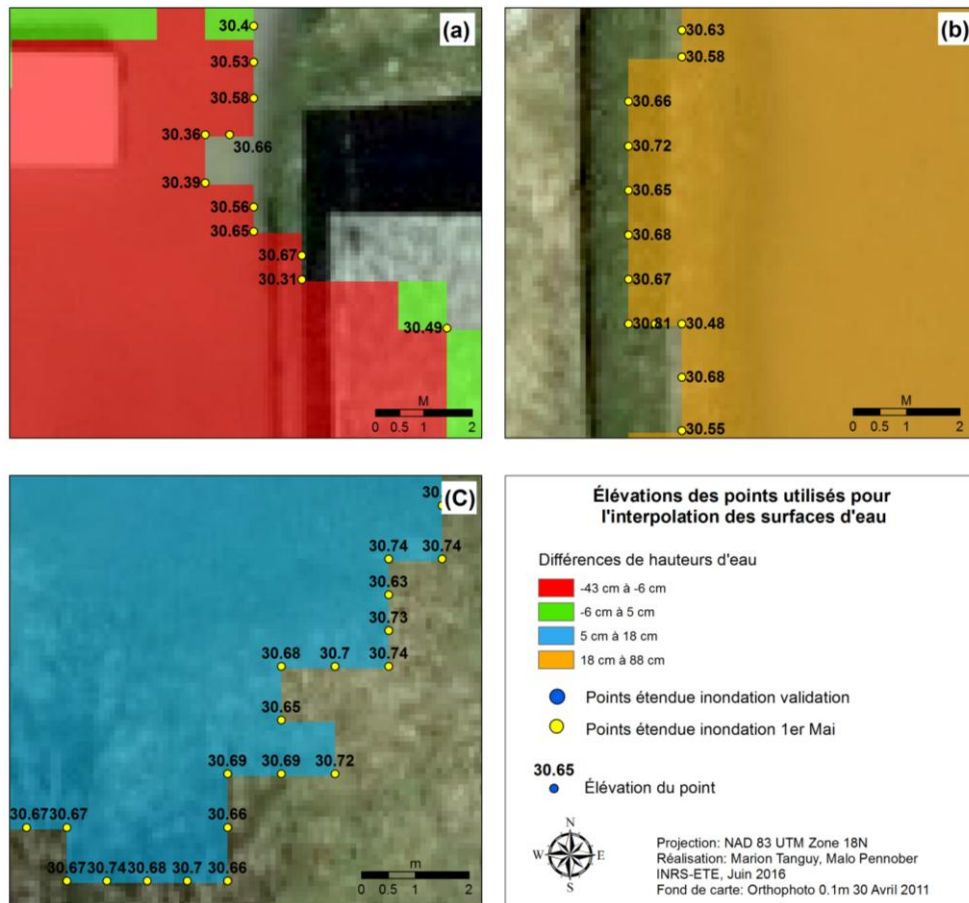


Figure 4.38: Élévations des points utilisés pour l'interpolation des surfaces d'eau, dans une zone présentant des différences de hauteurs d'eau inférieures à -15 cm (a), supérieures à 15 cm (b) et comprises entre 0 cm et 15 cm

Les zones présentant des surestimations des hauteurs d'eau de plus de 18 cm sont elles aussi peu étendues et restent localisées (elles sont représentées en orange sur la Figure 4.37). Elles se trouvent en très grande partie dans des zones où les points utilisés pour l'interpolation de la surface d'eau du 1^{er} mai se trouvent à des élévations supérieures à celle des points situés à proximité et utilisés pour l'interpolation de la surface d'eau du 30 mai (Figure 4.38(b)). Ces surestimations importantes des hauteurs d'eau sont dues à des surestimations locales de l'étendue de la zone inondée le 1^{er} mai, et dont les sources ont été présentées dans la section 4.2.1. La Figure 4.38(b) permet d'ailleurs de constater qu'une différence d'estimation de 1 m à 2 m seulement de la limite de la zone inondée peut occasionner une surestimation importante des hauteurs d'eau dans la zone.

Les erreurs d'estimation des hauteurs d'eau comprises entre -6 cm et 5 cm et les surestimations comprises entre 5 cm et 18 cm représentent la majorité de la superficie de la zone inondée, et en recouvrent 44% et 46%, respectivement. Si ces différences peuvent dans certains cas sembler peu élevées, en situation d'inondation, quelques cm d'eau peuvent parfois faire la différence entre un bâtiment non inondé et un bâtiment inondé, et ainsi entre des individus directement exposés à l'aléa et des individus qui en restent relativement protégés. La Figure 4.38(c) montre que si les points utilisés pour l'interpolation des surfaces d'eau pour le 30 avril et le 1^{er} mai ne se superposent pas, et présentent même parfois un écart important du fait de surestimations locales de l'étendue de la zone inondée le 1^{er} mai, le faible relief de la zone d'étude fait que leurs différences d'élévation restent généralement modérées. Les différences d'élévation entre la surface d'inondation du 1^{er} mai et la surface d'eau de validation restent ainsi peu importantes. De telles différences dans une zone d'étude au relief plus marqué pourraient ainsi engendrer des erreurs importantes d'estimation des hauteurs d'eau.

4.4.2 Avantages et limites de la méthode

Les différents résultats présentés dans les sous-sections précédentes ont montré que l'approche d'estimation des hauteurs d'eau présentée génère des estimations relativement précises des hauteurs d'eau, mais engendre également certaines erreurs d'estimation. Celles-ci restent peu étendues et sont localisées, mais pourraient être considérées comme trop élevées pour une utilisation dans un outil d'évaluation du risque lié à une inondation en cours. En dépit de ces erreurs, la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans d'autres études semble appuyer l'intérêt de l'approche proposée. A notre connaissance, les estimations les plus précises des hauteurs d'eau en zone inondée dérivées de la fusion des limites des zones inondées obtenues par imagerie RSO avec des données LIDAR d'élévation du sol ont été présentées par Schumann *et al.* (2007), pour une section rurale de la rivière Alzette (Luxembourg) (voir section 2.3.9). La comparaison des hauteurs d'eau obtenues dans la zone d'étude avec des hauteurs d'eau simulées à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS montre un RMSE de 18 cm, et de 16 cm quand elles sont comparées à des relevés réalisés sur le terrain. Les résultats qui ont été ici détaillés présentent également des erreurs moins importantes que celles obtenues à l'aide de la méthode proposée par Iervolino *et al.* (2015), qui se sont intéressés à l'estimation des hauteurs d'eau en zone urbaine, et plus précisément au niveau de bâtiments (voir section 2.3.9). La comparaison des résultats obtenus avec des estimations des hauteurs d'eau dérivées de mesures faites à une station de jaugeage située à proximité a en

effet révélé une erreur absolue d'estimation des hauteurs d'eau comprise entre 0,21 m et 0,81 m, dans le meilleur des cas.

L'approche d'estimation des hauteurs d'eau qui a été proposée a également pour avantage de ne pas être affectée par la présence de végétation aux limites de la zone inondée ou dans la zone intertidale. L'application de techniques de correction de la ligne d'eau dans ces zones, comme c'est le cas dans les travaux de Horritt *et al.* (2003) et de Hostache *et al.* (2009), n'est ainsi pas nécessaire.

Cependant, ces résultats ont été obtenus pour une petite portion de la zone étudiée, dans laquelle les erreurs de surestimation de l'étendue de la zone inondée étaient modérées, comme le montre la Figure 4.15. D'autres portions de la zone d'étude présentent des erreurs d'estimation plus importantes de l'étendue de la zone inondée, ce qui devrait donc résulter en des erreurs plus élevées d'estimation des hauteurs d'eau, et logiquement en un RMSE et en une erreur moyenne plus élevés eux aussi. Il conviendrait donc, dans le futur, de valider les estimations des hauteurs d'eau sur l'ensemble de la zone inondée étudiée.

4.5 Potentiel d'utilisation des méthodes en mode opérationnel

Afin de pouvoir être utilisées de manière opérationnelle au cours de la phase d'intervention, les méthodes proposées doivent répondre à certains critères (voir section 1.5.1). La disponibilité des données requises par ces méthodes est un de ces critères importants, puisqu'il détermine leur capacité à être utilisées de manière opérationnelle pour d'autres scénarios d'inondation. La disponibilité de ces données ayant déjà été abordée au cours de leur présentation, à la section 3.4, elle ne sera pas discutée ici. Cependant, les résultats obtenus nous permettent de présenter un certain nombre de suggestions quant aux paramètres d'acquisition des images RSO à privilégier. Les méthodes doivent également être automatisées, ou à défaut pouvoir être automatisables, et ne pas nécessiter l'intervention ni l'expertise de l'utilisateur. Enfin, les temps de traitement doivent être courts, pour que les résultats produits puissent venir rapidement en support aux opérations d'intervention.

4.5.1 Paramètres d'acquisition des images RSO à privilégier

Les résultats des deux cas d'étude présentés dans la section 4.3 ont montré que la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées permet d'obtenir des résultats précis à partir d'images RS-2 (bande C) en polarisation HH ayant des paramètres différents. En effet, malgré le faible angle d'incidence de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin et le fait que les surfaces d'eau libre aient une rugosité élevée à cause de l'action du vent, la précision de la cartographie finale des zones inondées est très proche de celle issue de l'image RS-2 en mode Fin, acquise avec un fort angle d'incidence et des surfaces d'eau calmes. Si, selon ces premiers résultats, les paramètres d'acquisition des images RSO semblent avoir peu d'impact sur la précision de la cartographie finale, certaines configurations d'acquisition pourraient tout de même être privilégiées. En particulier, des images de très haute résolution spatiale (soit de 8 m ou mieux) devraient être favorisées, pour permettre la détection la plus précise possible de la limite des zones inondées en eau libre et ainsi l'extraction d'un intervalle de récurrence d'inondation adéquat. De manière générale, plus la résolution spatiale de l'image est fine, plus sa taille nominale est réduite. Une inondation de grande envergure pourrait ainsi ne pas être entièrement couverte par une image de très haute résolution spatiale, telles que celles générées par le mode Spotlight du satellite RS-2. Cependant, le satellite Sentinel-1 SAR (bande C) permet d'acquérir des images avec une résolution spatiale allant jusqu'à 5 m en mode Stripmap, tout en ayant une largeur de fauchée de 80 km, ce qui permet d'imager l'intégralité d'une zone inondée telle que celle de la rivière Richelieu en 2011.

La polarisation HH, qui offre un meilleur contraste entre l'eau libre et le reste de l'occupation du sol, doit également être utilisée. Des tests réalisés avec la polarisation HV, qui est également disponible dans l'image RS-2 en mode Fin, ont en effet montré que l'histogramme des valeurs de rétrodiffusion moyenne des objets issus de la segmentation de la bande HV de l'image est uni-modal. La méthode d'extraction des seuils σ_1^0 et σ_2^0 à partir de la FDP Gamma des rétrodiffusions moyennes des objets d'eau libre ne peut alors pas fonctionner.

Enfin, et même si les résultats obtenus à l'aide de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin de l'inondation de la rivière Richelieu ont montré qu'il est possible d'obtenir des résultats très satisfaisants avec une image acquise avec un faible angle d'incidence, de plus forts angles d'incidence ($>35^\circ$) devraient être privilégiés. Cela permet en effet de réduire l'impact de la présence éventuelle de vent sur les valeurs de rétrodiffusion de l'eau, et ainsi de minimiser le

risque d'obtenir un histogramme des valeurs de rétrodiffusion moyennes sur lequel le mode de la FDP de l'eau ne peut être identifié.

Les différentes configurations des paramètres d'acquisition des images RSO d'inondation qui viennent d'être citées ne sont pas incompatibles entre elles. Plusieurs modes d'acquisition du satellite RS-2 permettent en effet d'acquérir de telles images, comme les modes Wide Fine, Fine, Wide Multi-Look Fine, Ultra-Fine ou encore Spotlight. Le mode Stripmap du satellite Sentinel-1 permet également de telles acquisitions. Enfin, la constellation de satellites RADARSAT, qui est en cours de développement, devrait également permettre d'acquérir des images avec cette combinaison de paramètres d'acquisition, et plus particulièrement avec ses modes d'acquisition de très haute résolution spatiale à 3 m (mode Spotlight) et de haute résolution spatiale à 5 m. Les largeurs de fauchée de ces deux derniers modes sont de 20 km et de 30 km, ce qui ne permet pas de couvrir de très grandes superficies à l'aide d'une seule image.

4.5.2 Automatisation des méthodes

La méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées n'a à ce jour pas été automatisée. Le principal frein à cette automatisation est l'utilisation de l'algorithme de segmentation multi-résolution du logiciel eCognition à la base de la classification orientée-objets, qui nécessite l'ajustement manuel de certains paramètres, et dont le code peut difficilement être intégré dans un script regroupant l'ensemble de la chaîne des traitements. C'est donc un des points de cette méthode qu'il conviendrait d'améliorer, en recherchant notamment une autre méthode de segmentation orientée-objets permettant d'obtenir des résultats aussi satisfaisants. Il faut de plus tenir compte du fait que certains traitements se font à l'aide du logiciel ArcGis (version 10.3) et d'un logiciel de traitement statistique des données, à savoir le logiciel R. Un des défis de l'automatisation de cette méthode est ainsi de réussir à combiner les outils et fonctions disponibles dans ces différents logiciels au sein d'un seul et même outil ou script. A l'inverse, la méthode d'estimation des hauteurs d'eau en zone inondée a été entièrement automatisée, et est disponible sous la forme d'un code Python.

4.5.3 Temps de traitement

Pour le cas d'étude qui a été présenté, 5 heures ont été nécessaires à la production de la carte des intervalles de récurrence d'inondation, pour une zone de 5 490 x 30 808 pixels et avec une

résolution spatiale de 1 m. L'ordinateur utilisé était un Intel © Core™ i7 CPU, 3.6 GHz, avec 36 Go de RAM. Le temps nécessaire à la production de cette carte dépend bien sûr de la taille de la zone d'étude considérée et de la résolution spatiale requise par les utilisateurs : plus la zone d'étude est grande et plus la résolution spatiale des données est fine, plus les temps de traitement augmentent, et inversement. On doit cependant souligner que la production de cette carte peut être réalisée en avance pour les zones où l'aléa inondation est connu et où le risque est avéré, ou encore durant le délai de plusieurs heures séparant la commande de l'image RSO et sa réception par l'utilisateur. La carte des intervalles de récurrence d'inondation peut de plus être utilisée pour plusieurs scénarios d'inondation pour la même zone d'étude, pourvu que l'occupation et l'utilisation du sol restent inchangées.

Les temps nécessaires aux opérations de traitement en temps quasi-réel de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées sont particulièrement courts. Pour la superficie couverte par la sous-image RS-2 en mode Fin (soit 2 147x6 938 pixels), ces temps de traitement sont d'environ 25 min. Enfin, le temps requis pour la production de la carte des hauteurs d'eau dans la zone inondée est d'environ 1h25min, avec les propriétés de système précédemment citées. Les temps de traitement requis par les méthodes proposées sont donc compatibles avec les exigences temporelles qui sont celles de la phase d'intervention.

4.6 Sommaire

Ce quatrième chapitre était consacré aux résultats de l'application des méthodes de caractérisation spatiale de l'aléa inondation à un scénario d'inondation réel.

Les résultats de la détection des zones inondées en eau libre sur deux images RS-2 de très haute résolution spatiale (mode Ultra-Fin et Fin), acquises en bande C et en polarisation HH, ont d'abord été présentés. L'application de la méthode développée à ces deux images a montré des résultats mitigés. La présence de vent sur les plans d'eau et de végétation en bordure des nombreux champs inondés, et dans une moindre mesure les imprécisions de la méthode de segmentation multi-résolution, ont eu pour effet de faire augmenter de manière importante les erreurs d'omission (35%) sur l'image en mode Ultra-Fin. Leurs effets sont cependant moins marqués sur l'image en mode Fin, qui ne présente que 12% d'erreurs d'omission. Il a été souligné qu'une réduction de ces erreurs à l'aide d'un seuil σ_2^0 situé dans des valeurs de rétrodiffusion plus élevées aurait été possible, mais que cela aurait eu pour effet de faire

augmenter les erreurs de commission. Ces erreurs de commission sont d'ailleurs déjà élevées sur l'image en mode Ultra-Fin (30%) et sont dues à la présence de nombreuses surfaces artificielles ayant une rétrodiffusion de type spéculaire, qui ont été isolées en objets lors de la segmentation à cause de la très haute résolution spatiale (3 m) de l'image. Si de telles erreurs sont également présentes sur l'image en mode Fin, une large partie des 10% d'erreurs de commission sont dues à la présence de champs non labourés et ayant des surfaces très lisses, et auxquelles l'angle d'incidence moyen de 48° de l'image est particulièrement sensible.

Le raffinement de la classification de l'image à l'aide des degrés d'appartenance à la classe Eau libre des objets de l'image et de leur intervalle maximal de récurrence d'inondation s'est avéré efficace, les erreurs de commission étant réduites à 1% dans le cas de l'image en mode Ultra-Fin et à 2% dans le cas de l'image en mode FIN, et cela sans dégradation majeure de la classification de l'Eau libre. Les résultats ont également montré la pertinence de l'utilisation combinée des degrés d'appartenance des objets à la classe Eau libre et des données d'intervalles de récurrence d'inondation.

La seconde partie de ce chapitre s'intéressait à la cartographie des zones urbaines et rurales inondées. L'intégration de ces données à caractère hydraulique à la méthode de cartographie finale des zones inondées s'est avérée être particulièrement pertinente, puisque 86% et 87% des pixels présents dans les zones urbaines inondées ont été correctement cartographiés sur l'image en mode Ultra-Fin et sur l'image en mode Fin, respectivement. En zone rurale, ces taux sont de 97% pour l'image en mode Ultra-Fin et de 98% pour l'image en mode FIN, ce qui est particulièrement élevé. Ces résultats démontrent ainsi qu'une cartographie précise des zones inondées est possible grâce à cette méthode, et cela même si toutes les surfaces inondées en eau libre n'ont pu être correctement identifiées au préalable. L'ensemble des sources d'erreurs d'omission et de commission ont été détaillées, puis discutées.

La précision de l'estimation des hauteurs d'eau en zone inondée a ensuite été analysée. Les résultats montrent que les estimations des hauteurs d'eau dans les zones inondées sont particulièrement précises, avec un RMSE chiffré à 8 cm et une erreur moyenne s'élevant à 5 cm. Ces résultats tendent donc à valider la pertinence de la méthode. D'autres tests sont cependant nécessaires pour confirmer cette pertinence.

Enfin, le potentiel d'utilisation de ces méthodes a été discuté. Bien que seules deux images RS-2 acquises avec des paramètres différents aient été utilisées pour tester la méthode, les résultats obtenus, et plus particulièrement l'analyse des erreurs de détection des zones d'eau libre, nous ont permis de définir des paramètres d'acquisition optimaux. La bande C, la

polarisation HH, et de forts angles d'incidence devraient ainsi être privilégiés. La question de l'automatisation des méthodes a également été soulevée. Si la méthode d'estimation des hauteurs d'eau est maintenant automatisée, certains points de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées doivent encore être adaptés pour permettre son automatisation. Les temps de traitement de ces méthodes en mode opérationnel sont tout à fait compatibles avec les exigences de la gestion de crise. Les traitements en mode pré-opérationnel sont plus longs, mais peuvent tout à fait être réalisés en avance pour les sections de rivière où le risque d'inondation est déjà connu.

PARTIE 2
ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ
ET DU RISQUE HUMAIN À UNE INONDATION EN COURS

5. ÉTAT DE L'ART DES APPROCHES D'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA POPULATION À L'ALÉA INONDATION

Ce cinquième chapitre se concentre sur l'autre composante indispensable à l'évaluation du risque, à savoir la vulnérabilité de la population, et présente un état de l'art des approches de conceptualisation et d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations. Il s'organise en deux sections. La première (section 5.1) présente les bases théoriques du concept de vulnérabilité, alors que la seconde (section 5.2) s'intéresse aux approches d'estimation de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation.

Le concept de vulnérabilité sera d'abord présenté (5.1.1), avant de décrire les différents types d'approches conceptuelles de la vulnérabilité développées depuis une trentaine d'années (5.1.2). Les différents facteurs de la vulnérabilité seront ensuite présentés puis définis (5.1.3), de même que les multiples dimensions de cette vulnérabilité (5.1.4). On insistera sur deux des aspects importants de ce concept, à savoir ses dynamiques temporelles et spatiales (5.1.5).

La seconde section discutera tout d'abord des indicateurs de vulnérabilité (5.2.1), qui sont véritablement au centre des approches d'évaluation de la vulnérabilité face aux différents types d'aléas. Des exemples d'indicateurs de vulnérabilité de la population à l'aléa inondation seront présentés (5.2.2), ainsi que les particularités des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à l'aléa inondation relevées dans la littérature (5.2.3). La dernière sous-section de ce chapitre s'intéressera particulièrement aux approches d'évaluation de la vulnérabilité orientées vers la phase d'intervention et discutera de leurs avantages ainsi que de leurs limites (5.2.4).

Cette revue de la littérature permettra de mettre en relief les avantages ainsi que les limites des approches existantes d'évaluation de la vulnérabilité orientées vers la phase d'intervention. Elle nous amènera à proposer, au chapitre 6, une méthode palliant au mieux ces limites et pouvant être intégrée à une approche d'évaluation du risque humain, adaptée à la phase d'intervention.

5.1 Théories et dimensions de la vulnérabilité humaine

Cette première sous-section présente l'ensemble des bases théoriques relatives à la vulnérabilité de la population aux aléas d'origine naturelle ou anthropique.

5.1.1 Définition du concept de vulnérabilité humaine

Jusqu'aux années 1970, il était très largement considéré que l'importance d'un désastre lié à un aléa d'origine naturelle ou anthropique était fonction des caractéristiques de l'aléa lui-même (Frazier, 1979; Maybury, 1986; White, 1975). Les approches de réduction du risque se concentraient alors avant tout sur le développement de stratégies d'action sur le processus physique, c'est-à-dire sur l'aléa lui-même (Veyret *et al.*, 2006). Les sociétés et les individus étaient considérés comme des victimes passives, et la manière dont les sociétés peuvent créer des conditions amenant les individus à faire face de manière différente à l'aléa n'était pas intégrée aux analyses du risque (Veyret *et al.*, 2006; Wisner *et al.*, 2004). Cette interprétation des désastres perdure encore bien souvent pour la population et dans les médias, pour qui les désastres restent avant tout causés par des événements naturels externes.

Ce n'est qu'à la fin des années 1970 et surtout au cours des années 1980, que les composantes sociales du risque ont été mises en relief, et que la vulnérabilité des systèmes humains a commencé à être considérée comme un facteur majeur des désastres (Dewan, 2013). Un paradigme alternatif émerge ainsi: c'est l'interaction d'un aléa avec des systèmes humains vulnérables qui entraîne un désastre ou une perturbation des systèmes. La vulnérabilité devient alors un axe majeur de réflexion pour la réduction des risques humains liés aux aléas d'origine naturelle et anthropique (Birkmann, 2006). On considère ainsi que l'analyse et la compréhension des composantes de la vulnérabilité humaine permettent de mieux définir et de mieux cibler les mesures de mitigation et de préparation, si ce n'est de restructuration socio-économique, menant à la réduction du risque humain (Cannon, 2000).

Depuis l'émergence de ce concept, un très grand nombre d'études se sont intéressées à la compréhension des causes de la vulnérabilité humaine et à son évaluation. Un des points majeur qui émerge de la lecture de ces travaux est la grande diversité de définitions données à ce terme. Selon Becerra (2012), on en recense en effet pas moins de 25. Des revues complètes des définitions de ce terme peuvent être trouvées dans Alwang *et al.* (2001), Brooks (2003), Thywissen (2006) ou encore dans Villagan de Leon (2006). Il n'y a donc pas à ce jour de

consensus quant à la définition de la vulnérabilité. Cela s'explique par le fait que ce terme est utilisé par différents groupes (académiques, agences de gestion des désastres, agences de développement, assurances, etc.), s'intéressant à des problématiques particulières, liées aux impacts potentiels d'aléas spécifiques, sur des éléments différents, tels que la population, les infrastructures, l'économie, le commerce, et cela avec des objectifs précis (ex : l'évaluation des dommages versus les projets de planification urbaine), et des temporalités différentes (prévention, intervention, retour d'expérience, etc.) (Birkmann, 2006; Cardona *et al.*, 2012; Schneiderbauer, 2007; Villagan de Leon, 2006).

Une des définitions fréquemment utilisées dans le domaine de la gestion des risques est celle proposée par la Stratégie Internationale pour la Réduction des Désastres des Nations Unies. La vulnérabilité y est définie comme « les conditions déterminées par des facteurs ou des processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui font augmenter la susceptibilité d'une communauté aux impacts d'un aléa » (*page 16*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2004). Cette définition est proche de celle utilisée par le Programme des Nations Unies pour le Développement (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2004), qui y ajoute également que ces divers facteurs et processus déterminent la probabilité et l'échelle des impacts humains résultant d'un aléa donné. Cette seconde définition montre bien que les caractéristiques de l'aléa (type, intensité, étendue, durée, etc.) ne sont plus considérées comme les seuls déterminants des conséquences humaines de l'aléa.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur le Changement du Climat opte pour une définition de la vulnérabilité intégrant les notions d'exposition de la population, de sensibilité et de capacité d'adaptation. Selon cette définition, la vulnérabilité « fait référence à la prédisposition des éléments exposés à l'aléa, tels que les êtres humains, leur moyens de subsistance et leurs richesses, à subir des effets négatifs lorsqu'ils sont impactés par un aléa. La vulnérabilité est liée à la prédisposition, aux susceptibilités, aux fragilités, aux faiblesses, aux déficiences ainsi qu'au manque de capacité qui favorisent les effets adverses sur les éléments exposés » (*page 69*, Cordonna *et al.*, 2012). C'est cette définition de la vulnérabilité, qui nous apparaît être la plus précise mais aussi la plus complète, qui a été considérée dans les travaux qui sont ici présentés.

Les définitions de la vulnérabilité dans les domaines de la gestion des risques liés aux aléas d'origine naturelle ou anthropique et de l'adaptation aux changements climatiques peuvent globalement être regroupées en deux catégories (Brooks, 2003). Une première catégorie

regroupe les approches considérant la vulnérabilité comme un état préexistant du système, et développé avant que celui-ci n'ait à faire face à l'aléa. Ces caractéristiques inhérentes au système vont influencer sa prédisposition à se préparer à l'aléa, à subir des dommages mais aussi à se remettre des perturbations occasionnées au système (Parker, 2000). Dans le cas des systèmes humains, la vulnérabilité est très fréquemment désignée sous le terme de « vulnérabilité sociale » (Chakraborty *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2003).

La seconde catégorie de définitions regroupe les approches qui considèrent la vulnérabilité en termes de quantité de dommages potentiels occasionnés à un système humain par un aléa particulier, et qui intègrent également l'influence des caractéristiques de ce système dans la mitigation ou le renforcement de ces impacts. La vulnérabilité du système est alors fonction de la nature de l'aléa, de sa fréquence d'occurrence, de l'étendue de l'exposition du système humain et de sa sensibilité aux impacts de l'aléa. On la retrouve souvent désignée sous le terme de *vulnérabilité biophysique* (Adger *et al.*, 2004). Ce terme permet de regrouper les composantes physiques de la vulnérabilité, associées au type d'aléa et à ses impacts directs, ainsi que ses composantes sociales (ou biologiques), qui sont liées aux propriétés du système affecté par l'aléa et qui déterminent sa capacité à réduire ou à amplifier ses impacts.

5.1.2 Approches conceptuelles de la vulnérabilité

La diversité des définitions de la vulnérabilité se reflète dans les nombreuses approches conceptuelles qui ont été développées depuis une trentaine d'années dans le but de fournir des outils de compréhension des éléments l'influençant (Adger, 2006; Füssel, 2007; Gallopín, 2006; Green *et al.*, 2007). On constate en effet que ceux-ci varient de manière parfois importante d'une approche à une autre. Ces approches sont souvent regroupées en différentes catégories ou perspectives, selon les éléments influençant la vulnérabilité qu'elles intègrent (Birkmann *et al.*, 2013; Cardona *et al.*, 2012; Cutter, 1996; McLaughlin *et al.*, 2008). Les plus généralement considérées sont les perspectives : a) biophysiques; b) socio-écologiques; c) politico-économiques; et enfin d) intégratives. Cette sous-section présente les lignes directrices de chacune de ces perspectives, et s'attache à les illustrer à l'aide d'exemples de modèles conceptuels de la vulnérabilité humaine.

a) *La perspective biophysique*

La perspective biophysique suggère que les composantes physiques de l'aléa, à savoir son occurrence, sa durée, sa fréquence ou encore sa magnitude, sont les déterminants principaux de la vulnérabilité humaine. Cette perspective s'intéresse ainsi aux impacts ultimes de l'aléa, et considère la vulnérabilité en termes de quantité de dommages occasionnés à un système à la suite de son interaction avec un aléa (Brooks, 2003). La vulnérabilité est ainsi mesurée en termes de coûts monétaires, de mortalité humaine, de dommages aux écosystèmes, etc. (Jones *et al.*, 2003), ce qui, selon Brooks (2003), représente davantage des indicateurs de conséquences que des indicateurs d'état d'un système avant l'occurrence d'un aléa. L'influence des caractéristiques des individus ou des groupes sociaux, et leur rôle d'acteurs dans la mitigation ou le renforcement de la vulnérabilité ne sont donc pas pris en compte. Les individus et la société sont alors considérés comme des victimes passives du risque (Veyret *et al.*, 2006). Cependant, la perspective biophysique est encore une approche fréquemment utilisée dans le domaine de l'analyse de la vulnérabilité face aux changements climatiques et aux risques naturels en général (McLaughlin *et al.*, 2008; Veyret *et al.*, 2006).

b) *La perspective socio-écologique*

La perspective socio-écologique met l'accent sur la nécessité de considérer les systèmes humains et environnementaux et leurs interactions de manière couplée pour évaluer le risque (Birkmann *et al.*, 2013). Cette perspective considère ainsi les capacités de transformation de la société sur la nature ainsi que les effets des changements environnementaux sur les systèmes sociaux et économiques (Cardona *et al.*, 2012).

Le modèle *Hazard-Of-Place* (HOP) développé par Cutter (1996) et qui se base sur le principe de la dangerosité des lieux, énoncé par Hewitt *et al.* (1971), illustre bien cette perspective. Selon ce modèle, les éléments biophysiques et sociaux d'un lieu interagissent et influencent de manière conjointe et égale sa vulnérabilité. Celle-ci est ainsi définie comme la combinaison de la construction sociale (la vulnérabilité sociale) et des conditions biophysiques (l'exposition potentielle à un aléa) d'un contexte spatial ou d'un lieu donné (Figure 5.1). La vulnérabilité sociale est perçue comme étant influencée par des facteurs tels que le niveau de développement, les relations sociales, le contexte politique mais aussi le revenu, l'âge, le genre,

etc. Les conditions biophysiques sont analysées par l'intermédiaire de l'élévation ou de la proximité à la source de l'aléa. La combinaison de ces deux aspects de la vulnérabilité, qui sont considérés de manière séparée avant d'être fusionnés, permet ainsi d'analyser la vulnérabilité à partir des caractéristiques physiques de la zone analysée, mais aussi des processus sociaux, économiques et politiques prenant place dans cette zone (Joakim, 2008). Ce processus d'analyse peut être répété dans le temps et permet d'intégrer les efforts de mitigation de l'aléa qui pourraient diminuer le risque pour une communauté donnée. Selon Dewan (2013) et Cutter *et al.* (2008), on peut reprocher à ce modèle le poids égal donné aux indicateurs de vulnérabilité sociale et biophysique, mais aussi l'absence de prise en compte des causes profondes de la vulnérabilité sociale, de l'impact des catastrophes et du processus de rétablissement qui s'en suit.

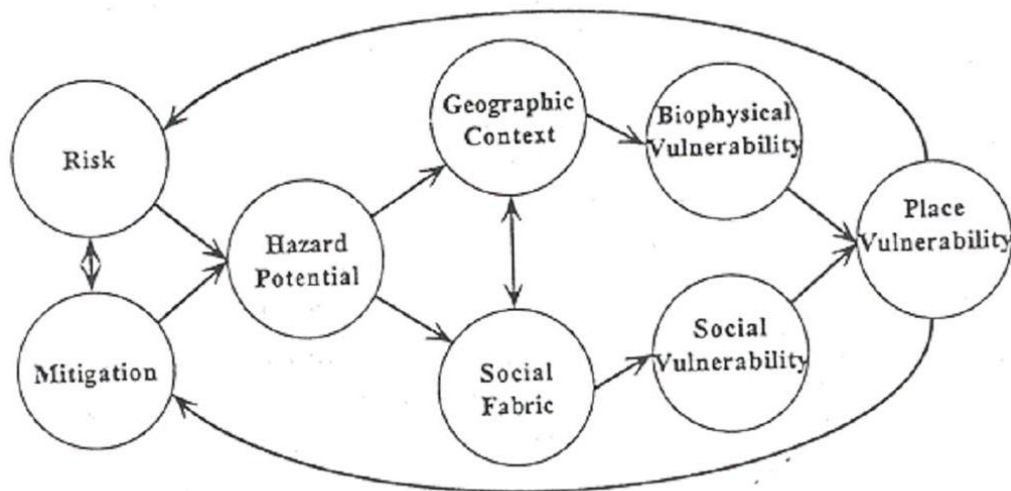


Figure 5.1: Le modèle de la vulnérabilité « Hazard-of-Place » (tiré de Cutter, 1996)

c) La perspective politico-économique

La perspective politico-économique considère la vulnérabilité comme une construction sociale, reposant sur le contexte socio-économique des communautés ou des individus. Elle accorde une attention importante à la manière dont les contextes organisationnels, institutionnels et politiques aident à façonner les capacités locales de préparation et d'adaptation, tout en

reconnaissant que ces structures sont reproduites à travers les actions des individus et des foyers.

Le modèle *Pressure and Release* (PAR), proposé par Blaikie *et al.* (1994), est une des approches les plus emblématiques de conceptualisation de la vulnérabilité basée sur la perspective politico-économique. Les désastres y sont analysés comme le résultat de l'occurrence d'un aléa, dont les impacts sont aggravés par divers processus de vulnérabilité (Becerra, 2012). Le modèle fait ainsi le lien entre la vulnérabilité à des conditions d'insécurité et le risque discret, dans un continuum connectant le risque à l'échelle locale à des facteurs de pression nationaux ou globaux, s'inscrivant dans l'économie politique des ressources et les forces politiques (Birkmann, 2006). La vulnérabilité est conceptualisée comme une condition générée par trois facteurs : les causes profondes de vulnérabilité (accès limité aux pouvoirs, aux ressources, idéologies, etc.), les pressions dynamiques qui influencent ces causes profondes (marché, institutions, formation, etc.) et les conditions d'insécurité environnementales, économiques ou sociopolitiques (relations sociales, action publique, etc.) (Figure 5.2).

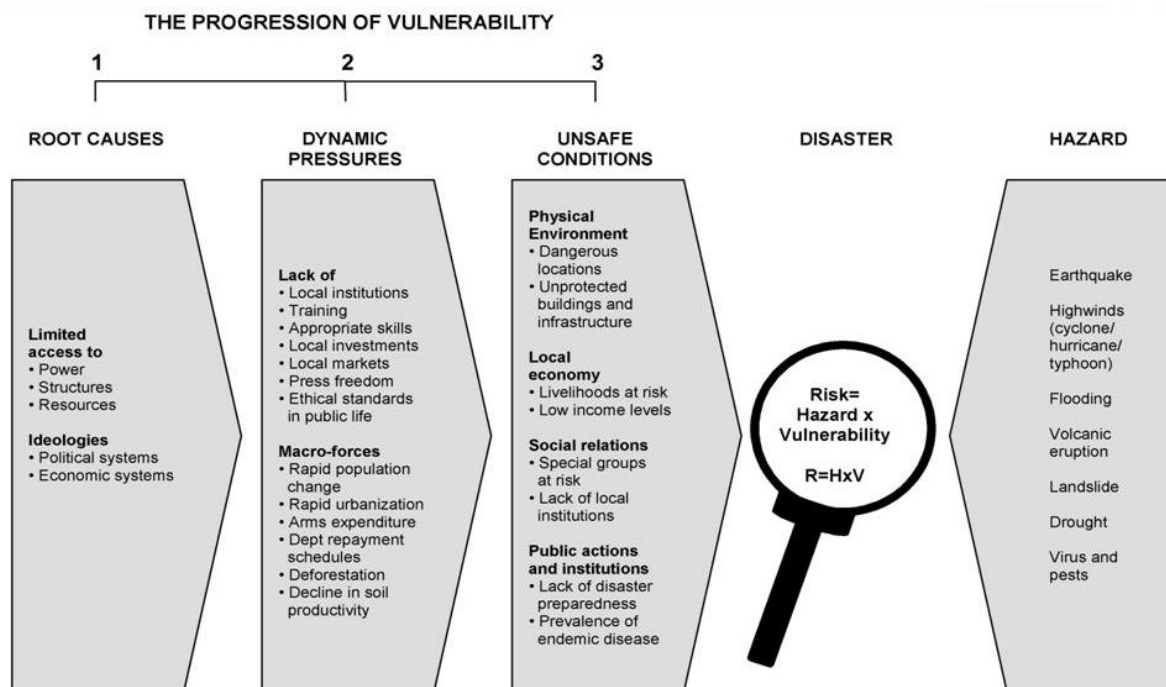


Figure 5.2: Le modèle « Pressure and Release » (tiré de Blaikie *et al.*,1994)

On peut reprocher à cette conceptualisation de la vulnérabilité de négliger les conditions d'insécurité générées au niveau local, pour se concentrer uniquement sur les niveaux nationaux et globaux. Elle met de plus l'accent sur les causes sociales du désastre, sans tenir compte de la manière dont l'aléa affecte les individus et la vulnérabilité à plus ou moins long terme (Birkmann *et al.*, 2013). C'est ainsi un modèle jugé trop statique. Le modèle *Access*, une version étendue du modèle *PAR*, pallie ces insuffisances (Wisner *et al.*, 2004). Il se concentre en effet en premier lieu sur la manière dont la vulnérabilité est développée de manière cyclique à micro-échelle (ex : individus, foyer) et considère les aléas eux-mêmes comme des processus créant de la vulnérabilité (Dewan, 2013). Selon cette approche, les accès différentiels aux ressources naturelles, informatives, économiques, etc. des individus et des ménages sont dus à des processus construits socialement et mènent à des expositions différentes aux aléas eux-mêmes, mais aussi à des disparités de résilience.

d) Les perspectives intégratives

Enfin, les approches intégratives abordent la vulnérabilité d'une manière qu'on pourrait considérer comme plus complète, mais aussi multidisciplinaire. L'exposition physique à l'aléa, la fragilité des systèmes socio-économiques et les capacités de réponse sociétale sont identifiées comme différentes causes de la vulnérabilité (Cordonna *et al.*, 2012). Un des éléments centraux de cette approche est le système de boucles de rétroactions, qui met en relief le fait que la vulnérabilité est un processus dynamique, et qui ne se limite pas aux déficiences des individus ou des sociétés, mais intègre également les processus d'intervention et d'adaptation qui peuvent être mis en place pour réduire la vulnérabilité (Birkmann *et al.*, 2013).

Le cadre conceptuel *BBC* (Bogardi *et al.*, 2004; Cardona, 1999) s'intègre dans cette perspective. Il met l'accent sur la vulnérabilité des éléments exposés à l'aléa, sur leur susceptibilité et leur capacité à faire face, et sur les outils d'intervention utilisés ou pouvant être utilisés pour réduire la vulnérabilité. Les différentes sphères ou dimensions de la vulnérabilité, identifiées comme ses dimensions sociales, environnementales et économiques, mais aussi la capacité à faire face des éléments exposés et les mesures d'intervention visant à la réduction des vulnérabilités, sont prises en compte de manière combinée et simultanée dans l'évaluation de la vulnérabilité (Figure 5.3).

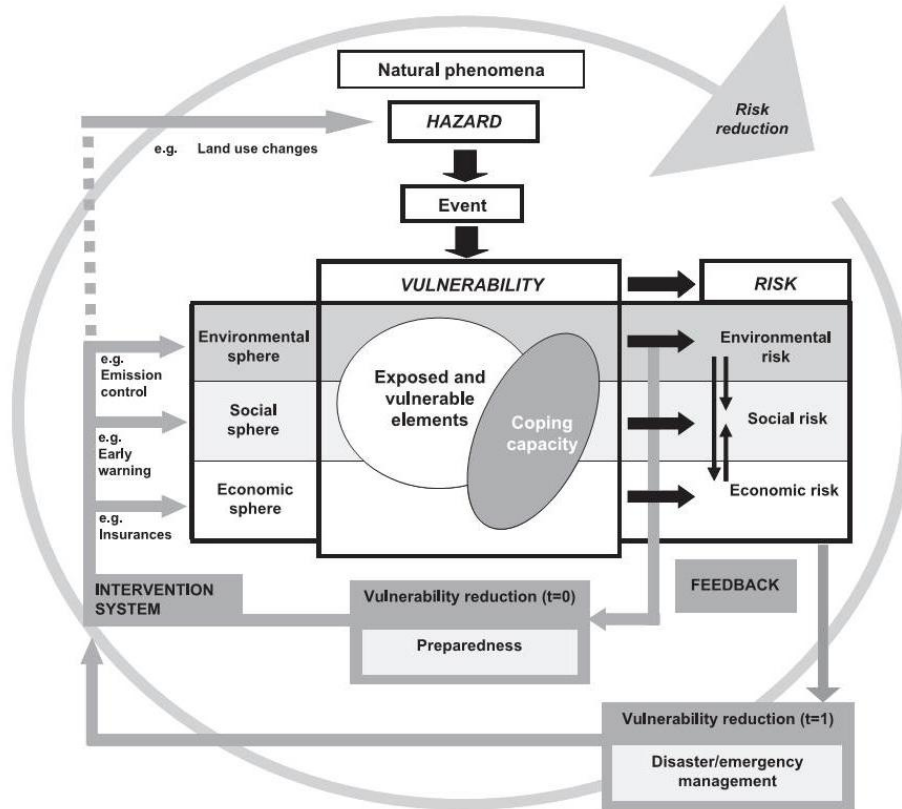


Figure 5.3: Le cadre conceptuel de la vulnérabilité BBC (tiré de Birkmann, 2006)

Ce modèle insiste ainsi sur la nécessité d’appréhender la vulnérabilité comme un processus dynamique, qui peut être modifié de manière rétroactive, selon deux catégories de stratégies de réduction des risques. La première catégorie ($t=0$) désigne les actions de réduction du risque prises de manière anticipée, avant que le risque ait lieu. La seconde catégorie ($t=1$) désigne les actions les interventions proactives et prévisionnelles (préparation, mitigation, amélioration des mesures d’intervention d’urgence) mises en place en réponse à l’aléa dans le but de réduire la vulnérabilité, et qui prennent place une fois que le risque est connu et identifié. Ces stratégies de réduction des risques influencent les différentes sphères ou dimensions de la vulnérabilité, mais aussi l’aléa lui-même. Elles résultent en la mitigation de l’exposition et de la susceptibilité des éléments vulnérables, mais aussi en le renforcement de leur capacité à faire face. Ce modèle insiste également sur la nécessité de ne pas considérer la vulnérabilité comme un élément isolé : on doit tenir compte des caractéristiques de l’aléa et des événements potentiels auxquels une société vulnérable, son économie et son environnement sont exposés, ainsi que de leurs interactions.

5.1.3 Facteurs de vulnérabilité

Si les approches conceptuelles présentées au cours de la section précédente présentent un certain nombre de différences, il est intéressant de noter que la plupart d'entre elles considèrent des facteurs communs de la vulnérabilité (Adger, 2006; Birkmann, 2006; Cardona *et al.*, 2012; Carreño *et al.*, 2007; Gallopín, 2006; McCarthy *et al.*, 2001; Simelton *et al.*, 2009; Turner *et al.*, 2003). Il s'agit de la *susceptibilité*, et du manque de *résilience*, qu'on retrouve également désignées respectivement sous les termes de « sensibilité » et de « capacité de réaction et d'adaptation » dans les approches s'intéressant à l'adaptation aux changements climatiques. Une fois encore, la définition de ces termes ne fait pas l'objet de véritables consensus. Nous nous attacherons ici à présenter les définitions les plus communément admises.

La *susceptibilité* (ou *sensibilité*) fait généralement référence à la prédisposition des individus, des infrastructures ou encore de l'environnement à être affectés par un aléa ou par un phénomène dangereux (Cardona *et al.*, 2012). Cette susceptibilité est liée à un ensemble de conditions intrinsèques et contextuelles d'ordre physique, social, économique, culturel, écologique ou encore institutionnel, qui vont déterminer le manque de résistance de l'élément à l'action de l'aléa et sa prédisposition à subir des dommages ou des perturbations (Birkmann *et al.*, 2013; Gallopín, 2006).

La *résilience* désigne la capacité d'un individu, d'une communauté ou d'un système humain à absorber les changements dus à l'occurrence d'un aléa ou d'une perturbation, à se réorganiser et à retrouver son état social, structurel, économique, politique, etc. initial ou un état proche de sa configuration initiale (Adger, 2000; Folke, 2006; Turner *et al.*, 2003). La *capacité d'adaptation*, dont le renforcement est souvent au centre des approches d'adaptation aux changements climatiques, fait référence à la capacité d'un système à s'adapter à un aléa ou à une perturbation et à modifier certaines de ses caractéristiques, dans le but de mieux faire face à des stress externes existants ou anticipés (Brooks, 2003). Elle désigne ainsi des actions réalisées généralement au préalable, avant l'occurrence de l'aléa ou de la perturbation, pour renforcer la capacité du système à faire face à l'aléa et ainsi réduire le risque.

Enfin, la *capacité de réaction* fait référence à la « capacité des individus, des organisations et des systèmes à faire face à des conditions adverses, à des désastres ou à des urgences en utilisant leurs compétences intrinsèques et les ressources à leur disposition » (Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes des Nations Unies, 2009). Il s'agit donc des actions entreprises au cours ou immédiatement après le désastre, généralement pour préserver

les vies humaines et répondre aux besoins essentiels de la population ou du système. La capacité des individus et plus largement des systèmes humains à mettre en place les mesures et les actions leur permettant de s'adapter à un aléa, d'y répondre ou d'absorber ses impacts, dépend largement du contexte humain et institutionnel, qui influence l'accès aux ressources financières, technologiques, informationnelles, structurelles, etc. et leur mobilisation (Adger *et al.*, 2007; Smit *et al.*, 2006; Wisner *et al.*, 2004). En ce sens, le manque de résilience et le manque de capacité d'adaptation font référence à un accès limité aux différentes ressources indispensables à l'adaptation du système à l'aléa, à sa capacité de réponse et à l'absorption des impacts du désastre.

Si la susceptibilité et le manque de résilience sont identifiés de manière presque systématique comme des facteurs de la vulnérabilité, le statut de l'*exposition* est bien moins clair. Certaines approches considèrent en effet que l'exposition est une composante de la vulnérabilité (Cutter, 1996; Messner *et al.*, 2006; Smit *et al.*, 2006), alors que d'autres considèrent qu'exposition et vulnérabilité sont deux facteurs du risque bien distincts (Cardona, 2005; Gallopín, 2006). Selon la première perspective, l'exposition est une propriété du système ciblé, et la vulnérabilité est une combinaison de l'exposition et de la susceptibilité, et de leurs relations (Cutter, 1996; McCarthy *et al.*, 2001). Ainsi, un système non exposé à l'aléa n'est pas considéré comme vulnérable. Selon la seconde perspective, l'exposition ne serait pas un attribut du système, mais plutôt un attribut de la relation entre le système et l'aléa. La vulnérabilité serait ainsi fonction de la sensibilité et de sa capacité de réponse, comme on l'a indiqué précédemment, et les dommages occasionnés à un système seraient fonction de sa vulnérabilité, des caractéristiques de l'aléa et de l'exposition du système à cet aléa (Gallopín, 2006). Un individu, une communauté, etc. peut ainsi présenter des caractéristiques qui le rendent vulnérable à un aléa, mais persistera sans problème dans la mesure où il n'est pas exposé à une perturbation. De la même manière, il est possible d'être exposé à un aléa, mais de ne pas y être vulnérable. Cependant, quelle que soit la perspective adoptée, le fait que l'exposition est un facteur de risque n'est pas réellement remis en question, puisqu'il est très largement considéré qu'en l'absence de population, de ressources économiques ou encore d'infrastructures dans une zone potentiellement exposée à un aléa, le risque est nul (Cardona, 2005; Thywissen, 2006).

5.1.4 Composantes de la vulnérabilité

La vulnérabilité des individus ou des communautés est bien souvent perçue comme résultant de caractéristiques socio-économiques, et en particulier de la pauvreté des individus (Chakraborty

et al., 2005; Dauphiné *et al.*, 2007; Wisner *et al.*, 2004). Cette perception de la vulnérabilité n'est pas fautive, puisqu'en règle générale, les individus les plus pauvres sont plus susceptibles d'être impactés par l'aléa que les individus plus riches, car ils disposent de moins de ressources pour faire face à l'aléa, pour se protéger mais aussi pour se remettre après le désastre. La lecture et l'analyse des différentes perspectives de la vulnérabilité présentée à la section 5.1.2 ont cependant démontré que cette perception est très limitée. La vulnérabilité de la population dépend d'un large ensemble d'éléments, généralement regroupés en dimensions, qui façonnent et conditionnent l'exposition de la population à l'aléa, sa susceptibilité et sa résilience.

Cinq dimensions de la vulnérabilité sont très fréquemment prises en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité (Birkmann *et al.*, 2013; Jha *et al.*, 2012; Vogel *et al.*, 2004). Il s'agit de a) la dimension physique ou fonctionnelle, b) la dimension économique, c) la dimension sociale, d) la dimension environnementale et e) la dimension politique/institutionnelle. La terminologie de ces différentes dimensions peut varier selon les études. La vulnérabilité sociale est par exemple fréquemment désignée sous le terme de vulnérabilité socio-économique (voir par exemple Kaźmierczak *et al.*, 2011; ou encore Kienberger *et al.*, 2009), car les caractéristiques économiques des individus ou des foyers sont souvent considérées comme des facteurs influençant la vulnérabilité sociale. Il en va de même pour la vulnérabilité environnementale, parfois désignée sous le terme de vulnérabilité écologique (voir par exemple De Lange *et al.*, 2010; ainsi que Sebald, 2010).

La *dimension physique ou fonctionnelle* de la vulnérabilité fait référence à la prédisposition d'une structure, d'une infrastructure ou d'un service à subir des dommages à cause d'un aléa spécifique. Cette dimension inclut généralement la localisation de ces éléments dans la zone d'action d'un aléa, les caractéristiques structurelles qui influencent le manque de résistance de ces éléments à l'aléa et leur susceptibilité à subir des dommages (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012).

La *dimension économique* fait le plus souvent référence à la susceptibilité d'un système économique, qu'il soit privé ou public, à être déstabilisé à cause de dommages directs, de pertes financières ou encore de perturbations de sa capacité productive, liés à l'occurrence d'un aléa (Cardona *et al.*, 2012).

La *dimension sociale* de la vulnérabilité fait référence à l'incapacité d'un groupe social ou d'un individu à anticiper, à résister, à se remettre ou encore à s'adapter aux chocs ou au stress liés à un aléa (Blaikie *et al.*, 1994; Cutter, 1996). La vulnérabilité sociale est influencée par un large

ensemble de caractéristiques sociales et économiques individuelles de la population, telles que l'âge, le genre, l'ethnie, le revenu, etc. (Cutter *et al.*, 2003).

La *dimension environnementale* de la vulnérabilité fait référence aux interrelations entre différents écosystèmes et à leur capacité à faire face, à se remettre de dégradations ou d'une diminution des ressources et à tolérer des pressions dans le temps et dans l'espace (Vogel *et al.*, 2004). Certains des éléments pouvant influencer la vulnérabilité environnementale sont par exemple les mauvaises pratiques de gestion de l'environnement ou encore une croissance de la population sans précédents et incontrôlée dans certaines zones (Jha *et al.*, 2012).

Enfin, la *dimension politique ou institutionnelle* de la vulnérabilité fait référence aux caractéristiques politiques ou institutionnelles d'une région, d'un pays, etc., et en particulier à sa stabilité politique et à son dynamisme économique, qui vont influencer la mise en place d'actions et de ressources, telles que le développement de stratégies de mitigation des risques, de diversification des moyens de subsistance, etc., visant à améliorer la capacité d'une société à faire face et à se remettre des impacts associés à un aléa.

Les différentes dimensions de la vulnérabilité peuvent être analysées individuellement, de manière à mieux les comprendre et à mieux anticiper leurs effets. Cependant, de nombreux auteurs insistent sur le fait qu'une évaluation précise de la vulnérabilité ne peut se faire qu'en tenant compte de manière simultanée de l'ensemble de ses composantes et en considérant leurs liens et leurs interactions dynamiques (Brooks, 2003; Cardona *et al.*, 2012; Cutter *et al.*, 2009; Schneiderbauer, 2007). Ils raisonnent ainsi en termes de système, incluant les caractéristiques intrinsèques de la population ainsi que l'ensemble des facteurs externes (politiques, économiques, environnementaux, culturels, etc.) influençant sa sensibilité à l'aléa, sa capacité à faire face et sa résilience. Les études dans lesquelles la vulnérabilité est conceptualisée comme un système insistent ainsi sur le fait que la compréhension des causes de la vulnérabilité et son évaluation, et à plus long terme le développement de mesures de mitigation et d'adaptation adéquate, devrait se faire par l'intermédiaire d'approches intégrées et multidimensionnelles (Adger, 2006; Green, 2004; Scheuer *et al.*, 2011).

5.1.5 Dynamiques temporelles et spatiales de la vulnérabilité

La vulnérabilité ne doit pas être considérée comme un état statique. Elle est au contraire dynamique, ses caractéristiques changeant continuellement dans le temps (Adger, 2006; Jongman *et al.*, 2015). L'évolution de l'état de vulnérabilité d'un système humain, que ce soit par

une diminution ou par un renforcement de cet état, peut être influencée par la modification d'une des composantes de ses nombreuses dimensions, mais aussi être liée à l'occurrence d'un aléa. Cette évolution peut se faire aussi bien sur le court terme que sur le long terme, et n'est jamais définitive.

Aubrecht *et al.* (2012) ont montré que la vulnérabilité de la population à certains aléas varie à l'intérieur du cycle quotidien, à cause des activités humaines et de la mobilité de la population (ex: population travaillant le jour, versus population résidentielle la nuit), qui modifient les conditions d'exposition de la population à l'aléa. La vulnérabilité de la population peut également augmenter de manière très rapide et importante suite à l'occurrence d'un aléa ou d'un désastre, qui laisse la population affaiblie et sans ressources. Elle devient ainsi davantage sensible aux impacts d'un aléa futur. Cette augmentation de la vulnérabilité peut cependant être temporaire, les sociétés affectées réussissant souvent à se remettre plus ou moins rapidement du désastre. En l'absence de mesures de protection ou d'adaptation, le rétablissement d'un niveau acceptable de vulnérabilité finit généralement par être contrebalancé par l'occurrence d'un nouvel aléa, qui interrompt son processus de rétablissement (Schneiderbauer, 2007). A l'inverse, la vulnérabilité peut diminuer de manière durable suite à l'application de mesures d'adaptation à un aléa donné ou à l'augmentation du niveau de développement d'une société. Dans ce cas, l'évolution de la vulnérabilité se fait généralement sur le long terme. La Figure 5.4, extraite et adaptée des travaux de Schneiderbauer (2007), représente ces différentes variations de la vulnérabilité. Les auteurs insistent sur le fait que l'augmentation du niveau de développement d'une société ne va pas toujours de pair avec une diminution importante de la vulnérabilité, l'occurrence d'un aléa venant toujours freiner cette diminution.

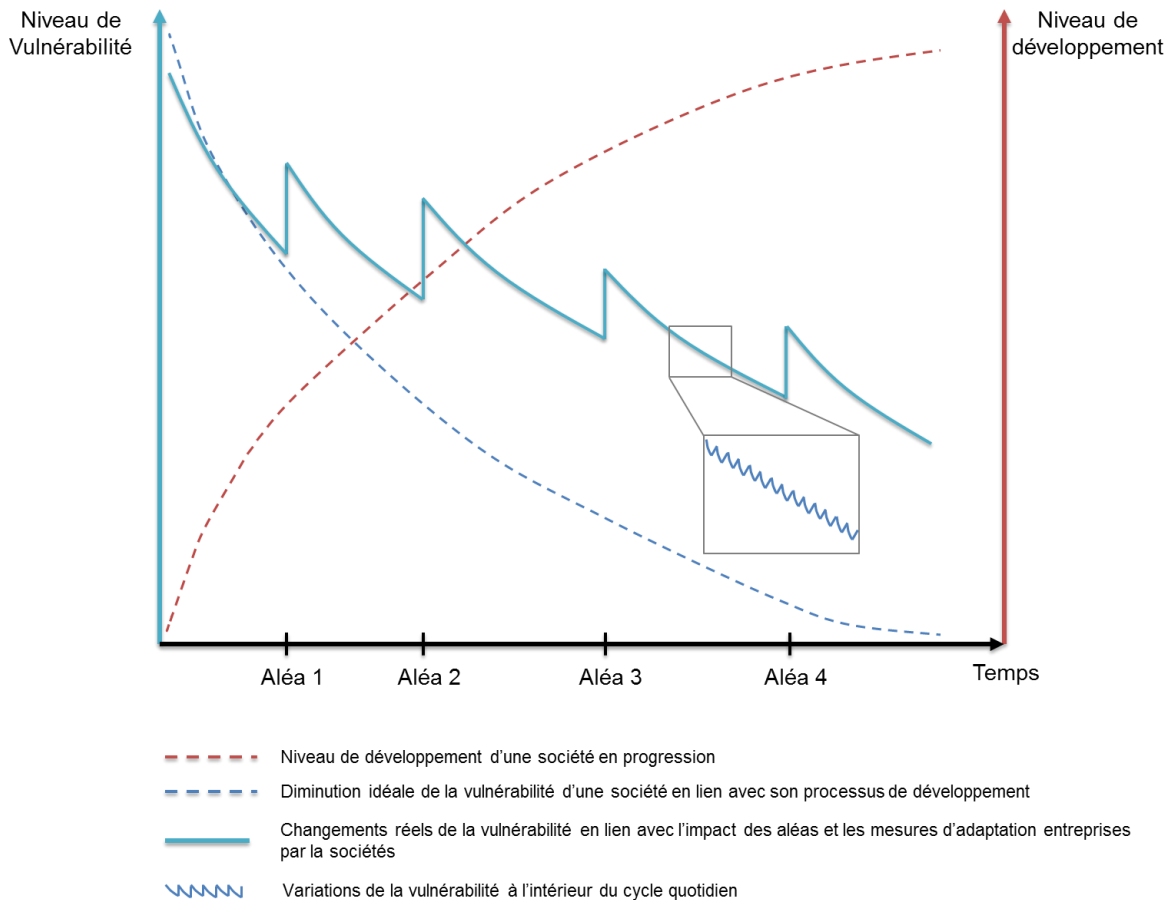


Figure 5.4: Représentation de la dynamique temporelle de la vulnérabilité (adapté de Schneiderbauer, 2007)

Cette dynamique temporelle devrait être prise en compte dans le développement de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité de la population. Cela implique, d'une part, d'identifier l'ensemble des facteurs pouvant mener à des variations temporelles de la vulnérabilité à un aléa, d'identifier leurs effets sur la vulnérabilité mais aussi la durée de ces effets. Cela induit, d'autre part, de mettre à jour régulièrement l'évaluation de la vulnérabilité, voire la méthode d'évaluation de la vulnérabilité elle-même.

Enfin, la vulnérabilité présente une forte dynamique spatiale. Les nombreux facteurs sociaux, environnementaux, physiques, économiques, etc. de la vulnérabilité créent en effet de fortes variations spatiales de la vulnérabilité, qui s'expriment à toutes les échelles (Buckle *et al.*, 2001; Cutter *et al.*, 2003; Kienberger *et al.*, 2009; Sebald, 2010). Celle-ci peut ainsi varier fortement d'un quartier de ville à un autre, ainsi qu'entre les différents foyers vivant dans un même quartier. Cela explique pourquoi deux foyers présents dans une même zone soumise à l'aléa

inondation peuvent subir différents niveaux de pertes et de dommages (Rashed *et al.*, 2003). Cette forte variabilité spatiale a été mise en relief dans de nombreuses études, et pour divers aléas (voir par exemple Fekete, 2009; Kubal *et al.*, 2009; ou encore Müller *et al.*, 2011). La généralisation des facteurs de vulnérabilité, mais aussi du niveau de vulnérabilité sur de grandes zones, devrait ainsi être évitée. Il convient donc de sélectionner avec soin l'échelle à laquelle l'analyse ou l'évaluation de la vulnérabilité sera menée, mais également d'adapter au mieux la méthode d'évaluation utilisée, ainsi que ses indicateurs, aux caractéristiques de la zone analysée (D'Ercole *et al.*, 2009; Scheuer *et al.*, 2011).

5.2 Évaluer la vulnérabilité

Cette seconde section s'intéresse à la manière dont la vulnérabilité humaine est évaluée, à l'aide notamment d'indicateurs de vulnérabilité, et présente différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation.

5.2.1 Les indicateurs de vulnérabilité et leur sélection

L'évaluation de la vulnérabilité est un élément essentiel du développement et de l'application des mesures visant à réduire les risques liés aux inondations. Évaluer la vulnérabilité permet en effet d'identifier les populations et les infrastructures vulnérables aux inondations, mais aussi d'identifier les principaux facteurs qui influencent et façonnent cette vulnérabilité. Il est alors possible de mieux définir et de mieux cibler les stratégies de réduction de la vulnérabilité et l'ensemble des ressources qu'elles induisent (Adger *et al.*, 2004). Au cours des sections précédentes, les caractéristiques de la vulnérabilité, mais aussi sa complexité, ont été mises en relief : la vulnérabilité est multidimensionnelle, est dépendante de la zone étudiée et de l'échelle considérée, est spécifique à un aléa et est également dynamique. Elle n'est, de plus, pas définie de la même manière selon les objectifs de l'étude (Ciurean *et al.*, 2013). Il n'est ainsi pas possible de définir une méthode universelle permettant de quantifier la vulnérabilité. De plus, certaines de ses dimensions, telles que les dimensions politiques ou institutionnelles de la vulnérabilité, peuvent être difficiles à évaluer ou à quantifier. Évaluer la vulnérabilité semble ainsi être une entreprise délicate. De nombreuses études ont cependant été menées au cours des dernières décennies dans le but de fournir une estimation de la vulnérabilité des systèmes humains à des pressions internes comme externes (Villagan de Leon, 2006). Un des éléments

centraux de ces méthodes d'estimation sont les indicateurs, qui, s'ils sont sélectionnés de manière pertinente et sont adaptés aux objectifs de l'évaluation qui est menée, permettent d'identifier et de visualiser certaines caractéristiques de la vulnérabilité.

Le terme d'indicateur n'a pas de définition clairement établie, comme la majorité des autres termes relatifs au concept de vulnérabilité cités précédemment. Une de ses définitions les plus exhaustives a été proposée par Gallopín (1997) dans le cadre d'un comité scientifique sur le développement d'indicateurs de développement durable, et a été complétée par la suite par Birkmann (2006). Selon cette définition, un indicateur est « une variable (et pas une valeur) qui est une représentation opérationnelle d'une caractéristique ou d'une qualité d'un système capable de fournir des informations sur la sensibilité, la capacité de réponse et la résilience d'un système aux impacts d'un événement mal défini lié à un aléa d'origine naturelle » (page 57, Birkmann, 2006). De manière générale, un indicateur peut être une variable qualitative (nominale), une variable de rang (ordinaire) et/ou une variable quantitative (Gallopín, 1997).

Pour être pertinent, un indicateur doit fournir une interprétation claire et précise d'une des qualités ou des caractéristiques du système, qu'on peut définir comme une des variables de la vulnérabilité, et de sa relation avec le phénomène d'intérêt (Birkmann, 2006). On doit également souligner que si un indicateur peut représenter une seule variable d'un système, il peut également représenter plusieurs variables agrégées décrivant un processus du système (Freudenberg, 2003, Kaufmann *et al.*, 2009). Afin de ne pas aboutir à une estimation faussée ou peu pertinente de la vulnérabilité d'un système à un aléa, il est donc important de sélectionner les indicateurs de vulnérabilité avec soin. Si aucun standard de sélection ni de développement d'indicateurs de vulnérabilité n'existe à ce jour, des lignes directrices ont été recommandées par plusieurs auteurs (Adger *et al.*, 2004; S.E. Chang *et al.*, 2015; Organization for Economic Cooperation and Development, 2008). Parmi les plus pertinentes, on retrouve celles développées par Maclaren (1996) pour fournir des indicateurs de suivi de l'état de développement durable des systèmes urbains. Elles peuvent cependant être utilisées pour le développement d'indicateurs de vulnérabilité, selon Birkmann (2006), qui leur a apporté de légères modifications. Selon cette approche, le développement d'indicateurs de vulnérabilité devrait idéalement se faire en neuf phases, tel que présenté à la Figure 5.5.

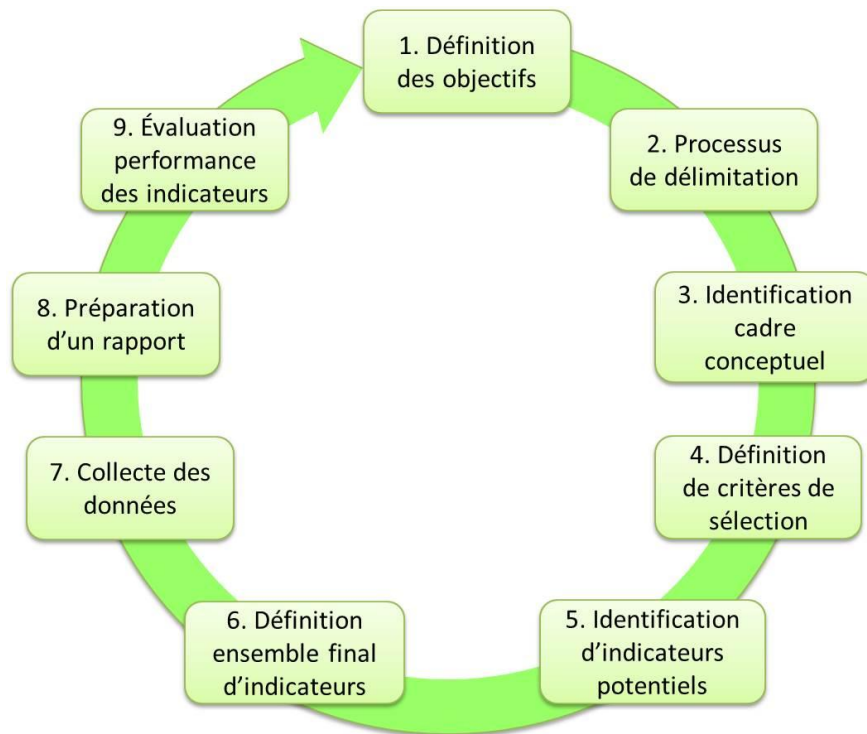


Figure 5.5: Processus de développement d'indicateurs de vulnérabilité (traduit de Ciurean *et al.*, 2013)

Le développement ou l'identification d'indicateurs de vulnérabilité devrait débuter avec la *définition d'objectifs* pertinents. S'il peut s'agir d'objectifs généraux, comme par exemple la réduction de la vulnérabilité des individus exposés à l'aléa inondation, la définition d'objectifs précis devrait permettre de mieux cibler les aspects de la vulnérabilité à examiner ainsi que les types d'indicateurs à intégrer. Un objectif précis pourrait par exemple être celui de renforcer la résilience de la population exposée à l'aléa inondation en améliorant les programmes d'aide financière aux sinistrés.

Il est ensuite nécessaire de réaliser un *processus de délimitation*, qui a pour but d'identifier les groupes ciblés par l'évaluation, ainsi que les limites spatiales et temporelles de l'évaluation. Ce processus de délimitation permet de clarifier et de préciser la portée des indicateurs qui seront développés.

La troisième phase du processus induit l'identification d'un *cadre conceptuel* approprié, qui permettra de structurer les thèmes et les indicateurs potentiels. Le choix de ce cadre conceptuel doit être réalisé en tenant compte de l'objectif de l'étude, du groupe et des limites spatiales et temporelles ciblées.

La quatrième phase consiste en la définition de *critères de sélection* des indicateurs de vulnérabilité potentiels, tels que la facilité d'interprétation de l'indicateur, la pertinence des données utilisées ou encore leur disponibilité.

Vient ensuite *l'identification d'un ensemble d'indicateurs potentiels* puis l'évaluation et la sélection individuelle des indicateurs, selon les critères de sélection identifiés précédemment. Cette étape permet d'aboutir à un *ensemble final d'indicateurs* de vulnérabilité.

Enfin, pour prouver l'applicabilité de l'approche proposée et la pertinence des indicateurs sélectionnés, il est indispensable de rassembler les données pour chaque indicateur. Cette phase peut s'avérer délicate, les données nécessaires n'étant pas toujours disponibles, en particulier pour des indicateurs liés à certains aspects de la vulnérabilité difficiles à mesurer ou à quantifier (ex : vulnérabilité institutionnelle ou politique, cohésion sociale, etc.). Cette étape peut avoir pour résultat de réduire le nombre d'indicateurs sélectionnés et peut éventuellement aboutir à un nouveau cycle de sélection d'indicateurs.

Enfin, les phases finales du développement des indicateurs devraient impliquer la *préparation d'un rapport* et *l'évaluation de la performance* de chaque indicateur. Il est indispensable de réévaluer ces indicateurs de manière régulière, dans la mesure où les caractéristiques de la vulnérabilité peuvent évoluer, où des données plus pertinentes peuvent devenir disponibles, et où les connaissances sur la validité d'indicateurs peuvent évoluer, etc. Il s'agit donc d'un processus itératif, tel qu'illustré dans la Figure 5.5.

5.2.2 Exemples d'indicateurs de vulnérabilité humaine aux aléas naturels

Dans le but de mieux illustrer ce qu'est un indicateur de vulnérabilité, nous avons choisi de relever les indicateurs utilisés dans quelques études portant sur l'analyse et l'évaluation de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels. Ceux-ci sont présentés au Tableau A4.1, dans l'Annexe IV. Les travaux présentés dans ce document s'intéressant au développement d'une approche d'évaluation du risque d'inondation, des études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité de la population à cet aléa ont été ciblées. Cependant, les indicateurs intégrés à deux approches d'analyse de la vulnérabilité à des aléas multiples sont également présentés (voir par exemple les travaux de Cutter *et al.*, 2000; et de Schneiderbauer, 2007). L'objectif est de mettre en relief les différences pouvant éventuellement exister entre les indicateurs de vulnérabilité relative à l'aléa inondation et les indicateurs ne ciblant pas un aléa en particulier. Le

Tableau A4.1 indique également les objectifs principaux des études sélectionnées, le pays dans lequel l'analyse prend place, la phase de gestion du risque visée ainsi que l'échelle d'analyse.

L'analyse de ce tableau non exhaustif montre que certains indicateurs de vulnérabilité sont utilisés dans plusieurs des approches répertoriées. Il s'agit en particulier d'indicateurs relatifs à l'âge de la population (personnes mineures et personnes pauvres), au revenu des ménages (revenu moyen, personnes pauvres, foyer sans voiture, non propriétaire du logement) ou encore au statut du ménage (ménages monoparentaux). Ces indicateurs, qui sont des indicateurs relatifs à la vulnérabilité sociale (ou socio-économiques), sont des indicateurs indépendants de l'aléa. Les indicateurs dépendants de l'aléa sont avant tout des indicateurs relatifs à la vulnérabilité physique, tels que le type de bâtiment, le nombre d'étages, les matériaux de construction, etc. Ils ne sont cependant pas pris en compte dans toutes les approches d'évaluation de la vulnérabilité. Enfin, on peut remarquer que malgré la nécessité de raisonner en termes de système soulignée par plusieurs auteurs, ou du moins d'aborder la vulnérabilité de manière multidimensionnelle (voir section 5.1.4), plusieurs approches ne considèrent que les dimensions sociales et/ou physiques de la vulnérabilité. Cela peut être en partie dû au fait que la prise en compte des aspects environnementaux ou politiques de la vulnérabilité n'est pas jugée pertinente pour les besoins de l'analyse menée. On suppose cependant que cela est avant tout dû au manque, voire à la quasi-inexistence, de données concrètes sur les dimensions environnementales et politiques de la vulnérabilité, qui empêche leur intégration.

5.2.3 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à l'aléa inondation

Le développement du concept de vulnérabilité, et la prise de conscience du fait que les risques liés aux aléas d'origine naturelle ou anthropique ne peuvent être réduits de manière efficace que par l'application de stratégies de réduction de la vulnérabilité adaptées aux caractéristiques des populations exposées à l'aléa, ont mené au développement d'un grand nombre d'outils et de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. Au cours des vingt dernières années, plusieurs études ayant pour objectif de développer des indices composites de la vulnérabilité applicables à un grand nombre de sites d'étude aux caractéristiques socio-économiques similaires ont ainsi été présentées (Balica *et al.*, 2009). D'autres travaux, particulièrement nombreux, ont cherché à fournir une évaluation de la vulnérabilité et une compréhension des facteurs l'influençant dans une zone précise, sans volonté de rendre la méthode développée applicable à d'autres zones d'étude.

Il existe une large variété de techniques pour calculer la vulnérabilité de la population face aux aléas naturels (Dewan, 2013). On les retrouve assez fréquemment regroupées en trois catégories d'approches, à savoir (a) les approches déductives, (b) les approches hiérarchiques et (c) les approches inductives (Dewan, 2013, P. Fernandez *et al.*, 2016, Tate, 2012).

Les approches déductives (a) sont axées sur la théorie et s'inspirent de cadres conceptuels établis, et synthétisent un faible nombre d'indicateurs (souvent moins de 10) normalisés et agrégés dans un indice composite de vulnérabilité. Les approches hiérarchiques (b) font la synthèse d'un plus grand nombre d'indicateurs (de 10 à 20 indicateurs, généralement), organisés en sous-indices représentant les composantes ou thèmes majeurs de la vulnérabilité, et permettant ainsi un positionnement significatif de chaque indicateur à l'intérieur de chacune de ces composantes. Enfin, les approches inductives (c) sont des approches davantage orientées vers les données, et analysent la vulnérabilité à partir d'un large nombre de variables (généralement plus de 20), qui sera ensuite réduit en un plus petit ensemble avant l'agrégation en un indice (United States Agency for International Development, 2014).

Cependant, certains auteurs ne considèrent que deux types d'approches, à savoir les approches inductives et déductives, et les distinguent principalement par la manière dont les indicateurs de vulnérabilité intégrés à la méthode sont sélectionnés (Adger *et al.*, 2004; Yoon, 2012). Alors que dans les approches déductives, les indicateurs de vulnérabilité sont sélectionnés en se référant à des théories établies de la vulnérabilité et à la littérature existante sur le sujet, ou encore à l'aide de l'avis d'experts, les approches inductives se basent sur des approches statistiques pour sélectionner les indicateurs de vulnérabilité parmi un large ensemble de variables.

Cette deuxième typologie est celle qui, selon nous, apparaît de la manière la plus évidente dans les études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation, qui est au centre de ces travaux. Afin de mieux illustrer les différences entre ces deux types d'approches et les particularités des méthodes les utilisant, plusieurs exemples seront présentés dans les sous-sections suivantes.

a) Les approches inductives

La majorité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sociale à l'aléa inondation basées sur une approche inductive utilisent la technique de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

pour réduire en un ensemble restreint de facteurs de vulnérabilité non corrélés et statistiquement significatifs le large ensemble d'indicateurs utilisés en entrée (Adger *et al.*, 2004; Tate, 2012; Yoon, 2012). Les variables identifiées par l'ACP, qui auront été normalisées, sont ensuite agrégées pour bâtir l'indice de vulnérabilité.

Cette approche de sélection statistique des indicateurs de vulnérabilité a pour intérêt d'offrir une grande flexibilité en ce qui concerne le choix des variables utilisées en entrée et le nombre de ces variables, et permet ainsi d'évaluer la vulnérabilité à l'aide d'un ensemble théoriquement plus robuste et plus cohérent de variables (Cutter *et al.*, 2003). De plus, le fait que les indicateurs ayant une influence majeure sur la vulnérabilité de la population dans une zone donnée soient identifiés à l'aide d'une méthode statistique représente un avantage certain lorsque cette méthode est appliquée à une zone d'étude où les facteurs influençant la vulnérabilité ne sont pas entièrement compris et identifiés (Rygel *et al.*, 2006).

Les méthodes inductives ont été rendues populaires par l'Indice de Vulnérabilité Sociale (ou SoVI pour *Social Vulnerability Index*) proposé par Cutter *et al.* (2003). Cet indice, qui découle du modèle *Hazard-of-Place*, développé également par Cutter (1996) (voir section 5.1.2), examine les tendances spatiales de la vulnérabilité aux aléas naturels à l'échelle du comté aux États-Unis, dans le but d'identifier et de comprendre les charges sociales du risque. Un total de 41 variables indépendantes standardisées relatives aux dimensions sociales de la vulnérabilité aux aléas environnementaux, mais aussi à ses dimensions physiques, économiques et politiques, est intégré à l'ACP. Celle-ci permet d'identifier un ensemble plus restreint de 11 variables non corrélées, et relatives par exemple à l'âge de la population du comté, à ses revenus, à sa dépendance économique au secteur primaire, à sa race ou encore au type de bâtiments. Les cardinalités de ces composantes sont déterminées par des experts, afin de s'assurer que les charges des composantes positives soient associées à une augmentation de la vulnérabilité et que les charges des composantes négatives soient à l'inverse associées à une diminution de la vulnérabilité. Les indicateurs sélectionnés sont placés dans un modèle additif qui calcule un sommaire de cotation, soit le SoVI, et cela sans pondération préalable des indicateurs à l'aide de méthodes quantitatives ou du jugement d'experts. Les scores du SoVI sont cartographiés par comté en 5 catégories allant de -1 à +1, sur la base de leur déviation standard par rapport à la moyenne.

Depuis son développement, cet indice et plus largement cette méthode de sélection des indicateurs de vulnérabilité sociale, ont été fréquemment utilisés pour l'analyse et l'évaluation de la vulnérabilité de la population à différents types d'aléas d'origine naturelle tels que les

tremblements de terre (Schmidtlein *et al.*, 2011), les ouragans (L. Chang *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2006; Myers *et al.*, 2008), les tsunamis (Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015; Wood *et al.*, 2010), les inondations côtières dues aux tempêtes (Chakraborty *et al.*, 2005; Rygel *et al.*, 2006), les sécheresses (OXFAM America, 2009) ou encore l'érosion (Borruff *et al.*, 2005).

Certaines études se sont également penchées sur l'utilisation de cet indice pour l'évaluation de la vulnérabilité de la population face aux inondations fluviales. Cutter *et al.* (2006) ont par exemple démontré l'applicabilité du SoVI pour l'évaluation de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation à l'échelle du secteur de recensement, pour une large zone d'étude s'étendant sur plusieurs états du sud-est des États-Unis. Sur les 32 variables intégrées à l'analyse, neuf composantes principales de la vulnérabilité sociale ont été identifiées par l'ACP. Ces composantes sont relatives, par exemple, à la pauvreté de la population, à son âge, à sa race, à son ethnie, à sa santé ou encore à sa localisation en zone urbaine ou rurale. Cette étude a permis de montrer que les résultats du SoVI sont particulièrement sensibles aux variations des trois critères constituant l'indice, à savoir la zone d'intérêt, l'unité de recensement et l'ensemble de variables corrélées intégrées dans l'ACP. Les résultats de cet indice offrent donc une collection explicite d'indicateurs se rapportant directement aux facteurs de vulnérabilité dans une zone et à une échelle précise, ce qui représente une information particulièrement pertinente pour le développement de stratégies de réduction des risques.

Des modifications ont par la suite été apportées au SoVi par Fekete (2009), et ont abouti au développement d'un Indice de Vulnérabilité Sociale (ou SVI pour *Social Vulnerability Index*), applicable à l'aléa inondation. Le SVI a pour objectif d'identifier, de quantifier mais aussi de valider les schémas démographiques de sensibilité, de capacité à faire face et d'exposition potentielle aux inondations fluviales à l'échelle du canton en Allemagne. Il est calculé comme la somme de trois types d'indicateurs : la fragilité, les conditions socio-économiques et la région. Ces trois types d'indicateurs ont été identifiés à l'aide d'une ACP réalisée sur un ensemble de 41 variables démographiques présélectionnées par les auteurs et issues de données de recensement. Une rotation Varimax a été utilisée pour maximiser la variance des charges, ce qui permet d'aider la classification des variables en composantes principales. Un critère de sélection appelé le critère de Kaiser a ensuite été appliqué pour identifier les composantes les plus importantes, soit celles ayant une valeur propre supérieure à 1. L'ensemble des variables sélectionnées sont standardisées, pour obtenir une valeur comprise dans l'intervalle [0,1]. Finalement, l'indicateur de fragilité consiste en la proportion de résidents âgés de plus de 64 ans par canton, alors que l'indicateur de conditions socio-économiques fait référence à l'espace

physique de vie par personne, au ratio de personnes sans emploi et au type d'éducation. L'indicateur de région consiste enfin en la densité de population et en le type d'habitation. La valeur du SVI est ensuite obtenue en calculant la somme des valeurs des indicateurs. Les cantons présentant de faibles valeurs de SVI sont caractérisés par une forte résistance de la population à l'aléa inondation, alors que de fortes valeurs de SVI indiquent une faible capacité de résistance.

Un des aspects intéressants de cette étude est qu'elle intègre un processus de vérification des tendances spatiales des résultats du SVI, à l'aide d'un second jeu de données indépendant issu d'enquêtes réalisées auprès de foyers affectés par des inondations dans trois cantons. Ce second jeu de données est analysé à l'aide d'une méthode d'analyse de régression logistique, qui permet de déterminer s'il existe bien une différence significative entre les variables indépendantes. Il ressort de cette seconde analyse que les tendances présentées par le SVI correspondent bien aux effets de scénarios réels d'inondation, ce qui prouve que les indicateurs de vulnérabilité utilisés sont valides. Les auteurs soulignent cependant que si ces facteurs présentent des résultats satisfaisants sur les quelques cantons étudiés, ils ne peuvent être généralisés à tous les cantons du pays, qui peuvent présenter des caractéristiques sociales et économiques différentes. Des analyses et tests plus approfondis doivent donc être réalisés sur un plus grand nombre de cantons pour valider une utilisation plus large de ces indicateurs.

Au Québec, Thomas *et al.* (2012) ont également choisi d'appliquer une méthode proche de celle de Fekete (2009) pour développer un « Indice de Sensibilité Sociale » (ISS) aux inondations en milieu urbain, dans un contexte de changements climatiques. L'étude s'intéresse particulièrement à la zone nord de l'île de Montréal, bordée par la rivière des Prairies. L'objectif de cet indice est de cibler les populations les plus vulnérables et les facteurs influençant la vulnérabilité, afin de fournir aux acteurs municipaux et provinciaux des données leur permettant de mieux cibler les stratégies de gestion des risques. Un total de 18 indicateurs de sensibilité sociale intégrés à l'ACP a été présélectionné par les auteurs suite à une analyse de la littérature, et selon la disponibilité et la qualité des données disponibles. Ces indicateurs sont relatifs aux caractéristiques sociales de la population par aire de diffusion, à l'emploi et au revenu, au logement, à l'immigration et enfin à l'éducation. Ils ont été préalablement normalisés à l'aide de la méthode des variables centrées réduites (*Zscore*). L'ACP a permis d'identifier 11 composantes non corrélées. Ce nombre étant jugé trop élevé, le critère de Kaiser a ensuite été appliqué pour identifier les composantes les plus importantes, soit celles ayant une valeur propre supérieure à 1. Finalement, quatre composantes combinant l'ensemble des indicateurs

identifiés par ACP ont été retenues : 1) Aînés, location et faible scolarisation; 2) Familles et population jeune; 3) Concentration et croissance démographique, et 4) Pauvreté et immigration. Ces indicateurs de sensibilité sociale diffèrent finalement assez peu de ceux identifiés dans les autres études utilisant un processus similaire d'identification des indicateurs de vulnérabilité, mais appliqué à des zones d'étude différentes. Les valeurs de chaque composante sont ensuite additionnées, pour obtenir finalement une valeur unique représentant le degré de sensibilité sociale de la population de chaque aire de diffusion. Dans le cas des études présentées, les valeurs de l'ISS sont classifiées par seuils naturels de Jenks et présentées en 4 classes (faible sensibilité, sensibilité moyenne, forte sensibilité, très forte sensibilité). Une valeur négative d'ISS pour une aire de diffusion indique une sensibilité moins forte de la population relativement à l'ensemble de la zone d'étude, alors qu'une valeur positive représente une plus forte sensibilité.

Enfin, Kazmierczak *et al.* (2011) ont également utilisé l'ACP pour identifier les composantes principales de la vulnérabilité sociale parmi un ensemble de 26 indicateurs décrivant la vulnérabilité des individus et des communautés aux inondations de surface et reflétant leur accès à l'information et leur capacité à se préparer, à répondre et à se remettre après un événement d'inondation. L'analyse est menée à l'échelle de l'aire de recensement (soit de 1000 à 1500 personnes), dans la ville de Manchester (Royaume-Uni). L'ACP a permis d'identifier 4 composantes principales de la vulnérabilité, liées à la situation matérielle des foyers, à la diversité des communautés et à la forte proportion d'enfants et de personnes âgées dans la population. A la différence des autres études présentées précédemment, ces différentes composantes ne sont pas agrégées pour créer un indice de vulnérabilité. Leurs valeurs sont en effet associées à des informations spatiales sur les zones à risque d'inondation et à des informations sur les types de bâtiments résidentiels, sur l'utilisation du sol, sur les espaces verts et sur les jardins, qui permettent de définir l'exposition de la population. C'est là un des aspects intéressants de cette étude. L'exposition n'est en effet pas prise en compte dans les approches précédemment citées, qui se concentrent uniquement sur les aspects sociaux et économiques de la vulnérabilité. La dépendance statistique entre ces différents facteurs est ensuite analysée à l'aide d'une analyse de corrélation par rang de Spearman, une technique de mesure de dépendance statistique non paramétrique entre deux variables. Une ANOVA unidirectionnelle est également réalisée pour comparer la proportion moyenne de zones d'exposition et d'aléa entre les zones les plus vulnérables. L'objectif de ces analyses est de savoir si les zones présentant de fortes vulnérabilités sont aussi celles présentant une forte exposition et une forte probabilité d'aléa inondation, et ainsi d'identifier les communautés les plus à risque. Les résultats obtenus montrent en effet une certaine corrélation entre ces différents facteurs : une

grande partie des populations les plus vulnérables de la ville de Manchester, à savoir les populations matériellement démunies et issues de communautés culturelles diversifiées, sont à fort risque d'inondation à cause d'une convergence de facteurs liés à leurs caractéristiques socio-économiques, à la distribution spatiale de l'aléa, ainsi qu'à l'utilisation du sol et au type de bâtiments présents dans la zone.

b) Les approches déductives

Les indices utilisant des approches déductives pour la sélection des indicateurs de vulnérabilité à l'aléa inondation sont nombreux (Meyer *et al.*, 2008). Parmi eux, on peut distinguer les indices pour lesquels la sélection de ces indicateurs se fait par l'intermédiaire du jugement d'experts, de ceux pour lesquels cette sélection est basée sur la théorie et sur la littérature existante.

Dans le domaine des approches mettant à profit le jugement d'experts, on peut par exemple citer l'Indice Intégré de Vulnérabilité aux Inondations (ou IFVI pour *Integrated Flood Vulnerability Index*) développé par Sebald (2010). Cet indice met à profit la technique du Processus Analytique Hiérarchique (PAH), introduit par Saaty (1977; 2008). Le PAH est une approche de prise de décision participative utilisant l'avis d'experts pour la sélection des indicateurs de vulnérabilité, mais aussi pour l'estimation de leur contribution relative (ou poids relatif), dérivée de comparaisons par paires. Un des avantages de la méthode PAH est qu'elle permet d'évaluer la cohérence du jugement des experts, par l'intermédiaire du calcul d'un ratio de cohérence, qui indique la probabilité que les jugements de chaque expert dans la matrice de comparaison par paires aient été générés de manière aléatoire ou non (Saaty, 1977). L'IFVI proposé par Sebald (2010) se présente comme une version simplifiée de l'Indice de Vulnérabilité Environnementale (ou EVI pour *Environmental Vulnerability Index*) développé par Kaly (2005) et du SVI présenté par Fekete (2009). Une telle simplification permettrait, selon l'auteur, une compréhension plus aisée des indicateurs de vulnérabilité, mais aussi de la manière dont l'indice de vulnérabilité est généré. Il devrait ainsi être facilement exploitable par les responsables du développement des stratégies de mitigation des risques.

L'IFVI intègre des indicateurs relatifs aux composantes sociales, économiques et écologiques de la vulnérabilité. Il intègre également les composantes physiques de l'aléa inondation, ce qui permet donc de réaliser une évaluation du risque humain à l'aléa inondation. Les indicateurs retenus pour représenter les composantes physiques de la vulnérabilité sont l'étendue de

l'inondation et la hauteur d'eau, obtenues par l'intermédiaire de relevés réalisés lors d'un évènement d'inondation majeure survenu dans la zone d'étude (une ville moyenne située au Sud de l'Allemagne). Ces données sont exprimées par cellule de 10 mètres par 10 mètres. Chaque composante de la vulnérabilité est composée d'un nombre limité d'indicateurs, sélectionnés par des experts selon la disponibilité des données requises pour l'intégration de cet indicateur à l'échelle d'analyse, soit par sous-district administratif. Suivant l'avis d'experts, les indicateurs les plus importants de chaque composante de l'indice reçoivent un poids plus important dans l'évaluation générale de la vulnérabilité. La méthode de classement et de comparaison par paires est également utilisée, et les résultats sont comparés à l'aide d'une approche de superposition booléenne. Cela permet ainsi de déterminer le poids unique de chaque indicateur dans l'IFVI, à partir des poids potentiellement différents attribués par les experts. Enfin, afin de dériver les estimations de la vulnérabilité, les variables de chaque composante sont agrégées, puis standardisées, afin d'obtenir une valeur comprise entre 0 et 1; 1 représentant le plus haut niveau de vulnérabilité et 0 une vulnérabilité très faible. Les composantes de la vulnérabilité, incluant sa composante physique, peuvent ensuite être agrégées, pour obtenir une évaluation de l'IFVI, par cellule de 10 m par 10 m. La manière dont l'IFVI est bâti permet donc une analyse individuelle des causes et des tendances spatiales de chaque dimension de la vulnérabilité, mais aussi une analyse spatiale du risque.

Connor *et al.* (2005) ont également développé un Indice de Vulnérabilité aux Inondations (ou FVI pour *Flood Vulnerability Index*), applicable à l'échelle du bassin versant, et dont l'objectif est de servir comme outil d'évaluation des risques d'inondation dus aux changements climatiques en relation avec les conditions socio-économiques et les politiques de gestion des risques dans le bassin. Le FVI consiste en 4 composantes, à savoir une composante météorologique, une composante hydrogéologique, une composante socio-économique et enfin une composante de « contre-mesures », qui fait référence à la résilience et à la résistance d'une zone face aux inondations, en lien avec les mesures de protections physiques et de préparation de la communauté. Les 11 indicateurs intégrés à ces différentes composantes, et qui font référence aux facteurs causant les évènements d'inondation (ex : la fréquence des fortes pluies, le nombre de typhons) ainsi qu'aux facteurs influençant les dommages causés par l'inondation (ex : taux de population âgée et jeune, taux d'investissement pour les travaux sur les cours d'eau), ont été identifiés par un panel de 50 experts. Une des particularités du FVI est qu'il est composé de deux sous-indices indépendants, à savoir un indice humain, qui correspond aux effets sociaux des inondations, et un indice matériel, correspondant aux impacts économiques des inondations. Le choix revient ainsi aux décideurs d'utiliser l'un et/ou l'autre de ces deux

indices, selon leurs besoins. Les poids des indicateurs de chacun de ces deux sous-indices sont calculés à l'aide d'une analyse par régression linéaire multiple, mettant à profit des données sur le nombre de décès et les pertes matérielles occasionnées par des événements ayant eu lieu au Japon dans le passé. Les valeurs du FVI produites par cette méthode sont comprises entre 0 (plus faible vulnérabilité) et 1 (plus forte vulnérabilité). Une des limites principales de cet outil est de reposer sur la disponibilité de données historiques sur les événements d'inondation et de pertes humaines et matérielles. L'absence de telles données, ou leur imprécision, peuvent donc rendre inapplicable ce FVI. De plus, l'utilité réelle de cet outil pour le développement de scénarios prévisionnels dans un contexte de changements climatiques semble contestable, puisque l'influence d'événements extrêmes n'ayant jamais eu lieu dans le bassin versant étudié ne semble pas pouvoir être pris en compte par le FVI.

On considère généralement que la sélection des indicateurs à l'aide du jugement d'experts permet d'aboutir à une évaluation plus fine de la vulnérabilité de la population, ces experts étant généralement sélectionnés pour leur bonne connaissance des caractéristiques de ce phénomène dans la zone étudiée. Cependant, le fait que ces indices requièrent le jugement d'experts afin d'être appliqués à des sites d'études ayant différentes caractéristiques peut éventuellement être considéré comme un frein à l'application de l'indice, ces jugements pouvant être parfois difficiles à obtenir. Certains auteurs ont ainsi préféré se baser sur les principes et théories déjà établis de la vulnérabilité ainsi que sur les travaux déjà présentés par des pairs.

Balica *et al.* (2009) ont par exemple proposé une version révisée du FVI développé par Connor *et al.* (2005), se passant de l'avis d'experts. Son l'objectif est d'évaluer les conditions menant à des dommages lors d'inondation, et cela à trois échelles spatiales : le bassin versant, le sous-bassin versant et la zone urbaine. Les composantes sociales, économiques, environnementales et physiques de la vulnérabilité face aux inondations sont évaluées à l'aide d'indicateurs spécifiques adaptés à chaque échelle d'analyse et faisant référence aux différents facteurs de vulnérabilité pris en compte, à savoir l'exposition de la population, sa sensibilité et sa résilience. Chaque composante de la vulnérabilité est évaluée de manière individuelle, à l'aide d'une équation générale qui lie les valeurs de tous les indicateurs relatifs aux facteurs de vulnérabilité pris en compte dans chaque composante. La valeur de sortie de cette équation étant sans dimension, il est possible de comparer les résultats obtenus entre différentes échelles spatiales, mais aussi entre différents cas d'étude, si des composantes et des échelles identiques sont utilisées. Ces résultats peuvent cependant être standardisés, pour rendre possible une comparaison entre les différentes composantes de la vulnérabilité, mais aussi pour faciliter leur

interprétation. Ces valeurs standardisées se placent dans l'intervalle [0 :1], 1 signifiant « le plus vulnérable aux inondations ». Les valeurs obtenues pour chaque composante de la vulnérabilité peuvent également être regroupées, afin d'obtenir un FVI total pour la zone analysée. Cette approche par réduction d'échelle, qui a été testée sur trois zones différentes (en Allemagne, au Cambodge et en Roumanie), présente l'avantage de fournir une vue générale de la vulnérabilité, mais aussi des éléments précis influençant la vulnérabilité à différentes échelles.

Dans le même ordre d'idée, Koks *et al.* (2015b) ont adopté une méthodologie utilisant des données sur l'aléa et l'exposition de la population combinées avec un indice de vulnérabilité sociale, dont l'objectif est de fournir des informations spatiales détaillées sur les caractéristiques sociodémographiques de la vulnérabilité à l'échelle du foyer et sur ses combinaisons spatiales avec l'aléa et l'exposition. Cette approche présente donc certaines similitudes avec les travaux de Kaźmierczak *et al.* (2011) (voir point (a)). L'indice de vulnérabilité sociale est construit selon une méthode proposée par Cutter *et al.* (2000) à l'aide d'un faible nombre de variables, qui sont celles que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature, à savoir le statut socio-économique, l'âge, l'ethnie, les foyers monoparentaux et l'année de construction de la propriété. Les données relatives à ces variables socio-économiques sont issues de données libres d'accès, fournies par zones de codes postaux pour le site d'étude, à savoir la ville de Rotterdam, aux Pays-Bas. L'indice de vulnérabilité de chacune de ces variables est défini comme le ratio de la valeur de cette variable par agrégat de 6 zones par rapport à la valeur maximale de cette variable dans l'ensemble de la zone d'étude. Un indice composite de la vulnérabilité est également créé, en calculant la moyenne arithmétique des indices de vulnérabilité de l'ensemble des variables préalablement standardisées. Les valeurs de cet indice composite sont ensuite classifiées en cinq catégories, selon leur déviation standard à la moyenne, ce qui permet de différencier spatialement les zones regroupant des foyers fortement vulnérables de celles regroupant des foyers faiblement vulnérables. Afin de mieux saisir le « risque » social, ces données de vulnérabilité sociales sont combinées avec des données spatiales sur l'aléa et l'exposition. Les zones exposées à l'aléa sont identifiées et classifiées par zone de 50 m x 50 m à partir de deux critères : la présence ou l'absence de digues de protection dans les zones inondables et la profondeur d'eau maximale issue de scénarios d'inondations côtières et fluviales par rupture de digues. L'exposition est définie par l'intermédiaire de la densité du bâti, par zone de code postal. La combinaison de ces différentes informations permet par exemple de constater que les zones inondables de la ville concentrent une proportion particulièrement importante des individus socialement vulnérables, les individus les plus éduqués et les plus riches (et donc les moins vulnérables socialement) vivant davantage en périphérie de la ville, dans des zones rurales peu

exposées aux inondations. De telles données permettent non seulement de cibler les zones où le développement de mesures de gestion des risques est nécessaire, mais aussi d'adapter ces mesures aux caractéristiques et aux besoins de la population.

L'analyse de ces différentes études permet de mettre en relief le fait que les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité mettant à profit une approche inductive tendent à ne considérer qu'une seule composante de la vulnérabilité, à savoir la vulnérabilité socio-économique. À l'inverse, les approches déductives ne se limitent pas à cette seule composante, et intègrent parfois d'autres composantes telles que les composantes environnementales et physiques de la vulnérabilité, à l'aide d'indicateurs adaptés. L'exposition de la population est également plus fréquemment intégrée aux analyses. C'est ainsi davantage une analyse du risque humain qu'une simple analyse de la vulnérabilité socio-économique de la population.

5.2.4 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité humaine orientée vers la phase d'intervention

Lorsqu'une inondation est en cours ou lorsqu'un phénomène d'inondation est anticipé, il est important pour les responsables des services d'urgence de cibler les individus ayant un besoin important, sinon prioritaire, d'assistance (ex : évacuation, aide à la pose de sacs de sables, de pompes, etc.). Cela est indispensable pour évaluer au mieux les besoins liés à l'inondation et pour que l'allocation des ressources disponibles soit la plus efficace possible (Lumbroso *et al.*, 2011a; Prasad, 2016). Les études présentées dans les sous-sections précédentes sont avant tout des études orientées vers la phase de prévention et d'atténuation, et cherchant à évaluer la vulnérabilité de la population dans le but de l'atténuer, sur le long terme. Il est donc pertinent se s'intéresser aux méthodes orientées spécifiquement vers la phase d'intervention et à leurs spécificités.

Les études portant sur les différents aspects de la planification et du déroulement des évacuations ont été nombreuses au cours des 20 dernières années. Un des aspects marquant de ces études est qu'elles intègrent rarement les aspects socio-économiques de la vulnérabilité. Un intérêt important est à l'inverse porté à des aspects plus techniques de la phase d'intervention, à travers notamment le développement de modèles permettant de déterminer la localisation la plus pertinente des refuges pour la population, selon des critères d'exposition à l'aléa, de proximité du lieu de résidence, de capacité d'accueil, etc. (Kar *et al.*, 2008; Prasad, 2012; Sanyal *et al.*, 2009). Plusieurs méthodes permettant de planifier des routes d'évacuation vers des refuges temporaires, ou encore de modéliser les conditions routières lors de

l'évacuation, ont également été présentées (Cova *et al.*, 2003; Kongsomsaksakul *et al.*, 2005; Sherali *et al.*, 1991). C'est ainsi l'exposition de la population à l'aléa en cours qui est au centre de ces études. Les caractéristiques socio-économiques de la population, et la manière dont elles peuvent influencer le processus d'évacuation, ne sont pas prises en compte. Seules quelques rares études se sont ainsi penchées sur les facteurs sociaux et mentaux influençant l'acceptation des ordres d'évacuation par les résidents présents dans une zone menacée, et ont cherché à simuler les impacts de ces facteurs sur le processus d'évacuation (Kakimoto *et al.*, 2014; Kusenbach *et al.*, 2009; Rashid *et al.*, 2007; Simonovic *et al.*, 2005).

De très nombreux auteurs se sont également concentrés sur le développement de méthodes permettant d'estimer les pertes en vies humaines et les dommages corporels dus à une inondation (DeKay *et al.*, 1993; Jonkman *et al.*, 2008; Penning-Rowsell *et al.*, 2005; Priest *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2006). Les facteurs influençant les décès ou les dommages corporels les plus fréquemment pris en compte sont les caractéristiques de l'inondation (en particulier, la hauteur et la vitesse de l'eau) et le degré d'exposition de la population, qui est souvent lié au délai entre l'alerte et l'arrivée de l'eau, à la localisation de la population dans la zone inondée (dans un bâtiment ou à l'extérieur), à la présence de refuges et parfois au type de bâtiments résidentiels dans la zone. Une fois de plus, les caractéristiques socio-économiques de la population ne sont pas intégrées à ces méthodes. De la même manière, l'état du réseau routier n'est pas considéré. Cette information est pourtant considérée comme un élément important pour l'évaluation des pertes en vies humaines et des dommages corporels, puisqu'elle permet d'identifier les routes pouvant être empruntées par la population pour évacuer la zone touchée par l'inondation, ou par les secours pour porter assistance à la population (Fernandez *et al.*, 2002; Pitt, 2008; Ramsbottom *et al.*, 2003).

Un des rares modèles opérationnels intégrant en partie ces différentes informations est le Life Safety Model (LSM), développé initialement par BC Hydro (société canadienne responsable de la production, de l'acheminement et de la distribution d'électricité en Colombie-Britannique, au Canada), pour planifier la réponse des services de sécurité civile lors de ruptures de barrages (Johnstone *et al.*, 2006; Lumbroso *et al.*, 2011a). Le modèle a été adapté pour prendre en compte un plus grand nombre d'aléas, dont différents types d'inondation (fluviales, côtières, éclair, etc.). L'objectif de ce modèle dynamique est de modéliser le comportement de la population au cours de l'inondation afin d'évaluer le nombre de personnes susceptibles d'être tuées, blessées ou ayant pu évacuer la zone, et de les localiser. Le LSM possède trois modules pour estimer les pertes en vies humaines pour 1) les personnes à pieds, 2) les personnes dans

des véhicules balayés par les eaux et 3) les personnes présentes dans des bâtiments qui s'effondrent. Les simulations des interactions de la population avec les eaux d'inondation tiennent compte d'un grand nombre de facteurs, tels que 1) l'instabilité des individus dans l'eau, selon leur taille, leur âge et leur poids, 2) l'instabilité des véhicules dans l'eau, selon leur type et leur poids, 3) la structure du bâtiment, et plus particulièrement son nombre d'étages 4) la vitesse et la hauteur de l'eau dans la zone, par intervalle de temps de simulation, et 5) la capacité horaire des routes d'évacuation en termes de nombre de personnes ou de nombre de véhicules. Pour chaque scénario, il est possible de tenir compte de la modification de la localisation des personnes dans la zone d'étude, en lien avec les avertissements qui ont pu leur être donnés avant l'inondation ou transmis au cours de celle-ci. Ce modèle est un des rares modèles dynamiques qui permette de tenir compte de l'évolution de l'exposition de la population au cours de l'inondation et des caractéristiques de l'aléa pour estimer les conséquences de l'inondation en termes humains. L'application de cette méthode sur des scénarios d'inondations passées en Angleterre, en France ou encore au Canada a montré que son estimation des pertes en vies humaines est assez précise. Les quelques indicateurs relatifs aux caractéristiques de la population (taille, âge, poids) sont avant tout des indicateurs de résistance physique à l'aléa adaptés à des crues éclairs ou violentes, et ne sont pas des indicateurs de sensibilité à des inondations plus lentes, comme les inondations fluviales. De plus, si cet outil permet de produire une évaluation du nombre de décès ou de personnes blessées, il ne permet pas de localiser avec précision les personnes ayant besoin d'assistance lors de l'inondation. Enfin, des précisions devraient être apportées quant aux données permettant d'estimer l'âge, le poids et la taille des individus exposés à l'aléa. Il nous semble en effet difficile d'obtenir des données précises sur ce genre de caractéristiques.

Le modèle LIFESim est un système de modélisation dynamique spatialement distribué d'estimation des pertes potentielles en vies humaines dues à des inondations par rupture de digue (Aboelata *et al.*, 2003). Ce modèle comprend quatre modules interdépendants, définis suite à l'analyse de données historiques sur des inondations meurtrières dues à des ruptures de digue. Un premier module permet d'extraire, à partir de modèles de simulation d'inondations par rupture de digue, des données sur les hauteurs d'eau et la vitesse de l'eau dans la zone d'étude, et cela tout au long de l'inondation. Le second module, le module de « perte de refuge », simule l'exposition des individus dans les bâtiments durant l'inondation, selon les dommages structurels estimés pour chaque type de bâtiment, la submersion du bâtiment et la mise en péril des individus dans les bâtiments partiellement endommagés, mais aussi selon l'heure de la journée à laquelle l'évènement survient. Le module « alerte et évacuation » simule

la dissémination spatiale de l'alerte dans la population et les différents processus de mobilisation et d'évacuation pouvant être adoptés suite à la réception de cette alerte. Le module tient également compte du moment où l'alerte a été émise, soit avant ou après le début de l'inondation, mais aussi de la ou des zones d'où l'alerte est émise. Le processus d'évacuation tient compte des éléments pouvant bloquer ou ralentir une évacuation en cours, comme la congestion routière ou l'inondation d'une route. Enfin, le module de « perte de vie » permet de réaliser des estimations de pertes en vies humaines à l'aide de fonctions de distribution probabilistes définies par McClelland *et al.* (2000) et par Aboelata *et al.* (2003). Chaque module échange des données avec les autres modules de la base de données, qui inclut plusieurs couches et tables de SIG. Toutes les informations sur la population, les routes et les bâtiments sont obtenues à l'aide de données de recensement et de données HAZUS MH, un outil nationalement standardisé développé aux États-Unis permettant d'estimer les pertes économiques et des dommages dus aux tremblements de terre, aux ouragans ou encore aux inondations (Federal Emergency Management Agency, 2003). Les paramètres de LIFESim sont modifiables, et permettent d'adapter l'outil aux caractéristiques de la zone et de l'inondation. Selon les auteurs, des améliorations du système sont prévues pour intégrer les opérations de secours à la population dans les simulations, mais aussi pour mieux définir la réponse des individus aux alertes ainsi que l'efficacité de leur mobilisation. C'est en effet, à notre sens, une des limites de cet outil. L'exposition de la population semble être encore une fois au centre des analyses, et l'influence des caractéristiques socio-économiques de la population n'est pas considérée comme un facteur influençant les impacts humains de l'aléa. Enfin, ce modèle fournit une fois de plus une estimation des pertes en vies humaines ou du nombre de blessés, mais n'a pas pour objectif de permettre la localisation des personnes ayant besoin d'assistance lors de l'inondation.

En dépit du fait que la vulnérabilité sociale a été largement reconnue comme un facteur déterminant du risque, celle-ci n'est que peu intégrée aux méthodes pouvant être mises à profit lors de la phase d'intervention (Prasad, 2016). Parmi les différents travaux permettant d'estimer les pertes en vies humaines et les dommages corporels à la population, seuls ceux de Penning-Rowsell *et al.* (2005) et de Aboelata *et al.* (2003) tiennent compte de la vulnérabilité socio-économique de la population, à travers des facteurs tels que l'âge de la population, son état de santé ou encore l'expérience d'évènements passés. Les études portant sur le développement de systèmes de support et d'aide à la décision pour l'organisation de l'intervention et pour l'assistance aux populations ayant des besoins particuliers, et intégrant la vulnérabilité sociale de la population, sont peu nombreuses.

Chakraborty *et al.* (2005), Prasad (2016) ou encore Wein *et al.* (2014) sont ainsi parmi les rares auteurs ayant cherché à mettre à profit les caractéristiques de la vulnérabilité sociale pour localiser les populations ayant besoin d'assistance lors d'évacuations liées à des phénomènes d'inondation. Chakraborty *et al.* (2005) prennent ainsi en compte trois caractéristiques spécifiques de la vulnérabilité sociale pour calculer un Indice de Vulnérabilité Sociale pour l'Assistance lors de l'Évacuation (IVSAE). Il s'agit 1) des caractéristiques de la population (population totale par zone) et des bâtiments (densité du bâti, nombre de maisons mobiles); 2) de l'accès différentiel aux ressources (niveau de pauvreté, absence de téléphone et de véhicule dans les ménages); et 3) des populations avec des besoins spéciaux (nombre de personnes âgées, d'enfants de moins de 5 ans et d'individus placés dans des institutions). Les variables relatives à chacune de ces trois caractéristiques sont fusionnées à l'aide d'une procédure développée par Cutter *et al.* (2000), et qui consiste globalement à calculer la moyenne arithmétique de l'ensemble des variables sélectionnées et préalablement standardisées. Les résultats de cet indice sont ensuite couplés à un indice de fort risque géophysique, qui permet de déterminer les zones où la probabilité d'occurrence de l'aléa est élevée. Le besoin d'assistance lors d'une évacuation est enfin défini comme le produit de l'IRGP et de l'IVSAE, calculé pour chaque bloc de recensement, et cela sans qu'aucune pondération ne soit appliquée aux indices. La fusion de ces deux informations permet d'examiner la variabilité spatiale des besoins d'assistance lors des évacuations, et ainsi de localiser les zones (à savoir les blocs de recensement) ayant un plus fort besoin d'assistance lors de l'inondation.

Dans le même ordre d'idée, Prasad (2016) cherche à évaluer le volume des besoins d'assistance lors de l'inondation ainsi que la concentration des besoins, et cela à l'intérieur de la zone d'inondation de récurrence 100 ans. Le volume et la concentration de ces besoins sont estimés à l'aide de 4 facteurs de vulnérabilité sociale, à savoir la pauvreté de la population, l'absence de moyen de transport personnel, les personnes âgées de plus de 65 ans et les maisons mobiles. Les données relatives à ces différents facteurs sont obtenues grâce aux données de recensement (dans le cas d'étude, celles des États-Unis) et sont disponibles par unité de recensement. Le volume des besoins est finalement exprimé à l'aide du nombre total de personnes ayant besoin d'assistance, par unité de recensement. La concentration des besoins est exprimée à l'aide de la proportion de la population totale de l'unité de recensement ayant besoin d'assistance. Les travaux de Wein *et al.* (2014) présentent des similitudes avec ceux de Prasad (2016). Les auteurs proposent en effet un Indice de Vulnérabilité à l'Évacuation (IVE) permettant d'estimer le nombre et la concentration de résidents pouvant présenter des difficultés à évacuer au cours d'un scénario d'évacuation de masse en lien avec une inondation

majeure. L'IVE est évalué à l'aide d'un ensemble de 6 indicateurs sociaux, à savoir la population totale par bloc de recensement, l'âge de la population, le revenu, la densité de population, la diversité ethnique de la population, et la langue. Les données relatives à chaque indicateur sont normalisées, puis sont simplement additionnées par bloc de recensement et sont enfin divisées par le nombre total d'indicateurs. L'IVE est ensuite représenté à l'aide de cinq classes définies par quantiles, allant d'une très faible vulnérabilité (<20%) à une très forte vulnérabilité (>20%). Les caractéristiques spatiales de l'aléa ne sont ainsi pas prises en compte.

Il est intéressant de noter que ces méthodes cherchant à estimer les besoins d'assistance de la population lors d'évacuations à l'aide d'indicateurs de vulnérabilité sociale diffèrent finalement peu des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sociale à l'aléa inondation présentées dans la section 5.3.4. Ces méthodes se concentrent sur la vulnérabilité socio-économique de la population, et ne prennent pas en compte d'autres aspects déterminants pour la sécurité de la population. On pense par exemple au type de bâtiment dans lequel les individus se trouvent, et qui peut soit fournir un refuge lors de l'inondation soit au contraire renforcer son exposition à l'aléa, mais aussi à l'état des routes permettant d'évacuer ou à encore à l'effet des systèmes d'alerte. De la même manière, ces approches ne mettent pas en lien la vulnérabilité de la population et les caractéristiques physiques de l'aléa au cours de l'inondation, ce qui en fait des approches statiques, davantage orientées vers les phases de planification ou de prévention.

Un des très rares modèles opérationnels intégrant certains de ces aspects est, à notre connaissance, le modèle « Flood Risk to People », développé par le Département de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires Rurales du gouvernement britannique (Ramsbottom *et al.*, 2003; 2004). Ce modèle, qui est destiné à être appliqué au Royaume-Uni, cherche à évaluer le nombre de blessés et de décès dans les zones affectées par l'inondation. Celui-ci est évalué à l'aide de 4 facteurs, soit le nombre d'individus dans la zone, le niveau de l'aléa, la vulnérabilité de la zone, et la vulnérabilité de la population présente dans cette zone.

Le niveau de l'aléa est défini à l'aide des caractéristiques de l'aléa pouvant constituer un risque direct pour la population. Il est ainsi calculé comme le produit de la vitesse des flots (en m/s), de la hauteur d'eau (en m), et de la présence de débris. Des modèles hydrauliques 2-D, à savoir les modèles TUFLOW et Telemac 2D, sont utilisés pour estimer les hauteurs d'eau et la vitesse des flots à l'intérieur de différentes zones de récurrence d'inondation, et cela en tenant compte de la présence ou de l'absence de systèmes de défense contre les inondations. La consultation d'experts mais aussi d'archives relatives à des scénarios d'inondations passées est nécessaire afin de déterminer la présence éventuelle de débris dans la zone lors de l'inondation, qui est

difficile à modéliser à l'aide de logiciels hydrauliques. Les données de hauteur d'eau, de vitesse des flots et de présence de débris sont fusionnées pour créer une carte du niveau de l'aléa.

La vulnérabilité de la zone est définie par la somme des scores de trois facteurs, à savoir : la vitesse de montée des eaux, le type de bâtiment résidentiel (bâtiments avec ou sans étage), le système d'alerte en place dans la zone étudiée, et la nature de la zone (zone résidentielle, appartements de plusieurs étages, zone commerciale ou d'activité). Enfin, la vulnérabilité des individus est calculée comme la somme du pourcentage de personnes âgées de plus de 75 ans dans la zone d'étude et du pourcentage de personnes malades et handicapées. Si l'intégration d'autres indicateurs de vulnérabilité sociale, tels que le niveau de pauvreté, la langue, l'ethnie, etc. a été considérée, il a finalement été décidé que ces autres indicateurs ne sont pas particulièrement appropriés pour évaluer le risque direct de blessures associées à une inondation. L'ensemble des données nécessaires à l'estimation du nombre d'individus dans la zone, de la vulnérabilité de la zone et de la vulnérabilité de la population est disponible auprès d'organismes gouvernementaux britanniques, ce qui permet d'assurer l'applicabilité de l'outil à un grand nombre de zones.

Différentes informations peuvent être extraites de la fusion des informations sur l'aléa et sur les vulnérabilités. Il est possible d'estimer le nombre total de personnes exposées à l'aléa, ainsi que le nombre total de blessés ou de décès par zone de récurrence, par années, ou encore selon la distance à la rivière. Le nombre de blessés peut également être cartographié pour la zone étudiée, et cela par cellule de 1 km par 1 km. C'est d'ailleurs une des limites du modèle « Flood Risk to People » : s'il permet d'estimer le nombre de blessés ou de décès, l'échelle d'analyse utilisée ne permet pas de localiser avec précision les individus ou les foyers les plus à risque lors de l'inondation. De plus, si l'existence de systèmes d'alerte est intégrée à l'analyse, l'effet de l'inondation des routes permettant l'évacuation de la population ne semble pas être pris en compte dans l'évaluation du risque, comme c'est le cas dans le modèle LIFESim ou dans le Life Safety Model.

Finalement, dans un rapport présentant les enseignements pouvant être tirés des inondations dramatiques qui ont touché certaines régions d'Angleterre au cours de l'été 2007, Pitt (2008) soulève l'importance de tenir compte du manque de ressources essentielles (eau potable, électricité, réseaux de transport et de communication, etc.) sur la vulnérabilité de la population au cours de la crise. Selon l'auteur, l'absence de certaines ressources essentielles, par la défaillance ou la destruction des infrastructures qui produisent ces ressources, renforce la vulnérabilité des individus dont le bien-être et la sécurité dépend de la disponibilité de ces

ressources, et cela qu'ils soient directement exposés à l'inondation ou non. Or, on peut noter que le réseau routier est la seule infrastructure produisant une ressource essentielle pour la population ayant été intégrée dans les études précédemment citées. Les études tenant compte de l'absence d'autres ressources essentielles sur la vulnérabilité de la population au cours d'une inondation sont ainsi peu nombreuses. Une des rares études s'intéressant à l'évaluation de l'impact de la défaillance ou de la destruction des infrastructures essentielles sur la population lors d'une inondation a été présentée par Robert *et al.* (2001). Cette étude repose sur le développement de courbes de défaillance, mettant en lien la hauteur d'eau dans une infrastructure essentielle et le niveau de fonctionnalité des différentes ressources produites par cette infrastructure. Ces niveaux sont ensuite traduits en termes d'exposition pour la population, selon le type et le nombre de services essentiels qui ne sont plus fournis à la population. L'objectif est ainsi de fournir des informations de base aux services de sécurité civile, leur permettant d'élaborer les plans de mesure d'urgence adéquats. Les travaux présentés s'intéressent spécifiquement à certaines infrastructures jugées plus sensibles lors d'une inondation, à savoir les hôtels de ville, les casernes de pompiers, les postes de polices, les écoles et garderies, les institutions de santé, les entreprises à risque environnemental et enfin les usines de filtration d'eau potable. Seul l'impact de la défaillance des infrastructures essentielles lors de l'inondation est pris en compte dans cette approche, qui n'a selon nous pas été appliquée de manière opérationnelle.

5.3 Sommaire

La vulnérabilité est un concept relativement récent, et n'est véritablement considérée comme un facteur du risque que depuis une trentaine d'années. Depuis l'émergence de ce concept, de nombreuses approches conceptuelles de la vulnérabilité sociale ont été présentées. Elles se donnent pour objectif de fournir des outils d'identification et de compréhension des éléments influençant la vulnérabilité, et éventuellement des bases de réflexion pour le développement d'approches d'évaluation de la vulnérabilité.

Ces approches conceptuelles montrent que la vulnérabilité est influencée par plusieurs éléments, qui façonnent et conditionnent l'exposition de la population à l'aléa, sa susceptibilité et sa résilience. Ces éléments sont généralement regroupés en cinq dimensions ou composantes, à savoir la dimension physique ou fonctionnelle, la dimension économique, la dimension sociale,

la dimension environnementale et enfin la dimension politique ou institutionnelle. Une évaluation complète et précise de la vulnérabilité devrait en théorie se faire en tenant compte des éléments s'inscrivant dans l'ensemble de ces dimensions, et en considérant leurs liens et leurs interactions dynamiques. Cependant, certaines des dimensions de la vulnérabilité, comme sa dimension politique ou institutionnelle, sont plus difficilement évaluables ou quantifiables. De plus, selon les objectifs de l'évaluation de la vulnérabilité, la prise en compte de l'ensemble de ces dimensions ne semble pas toujours pertinente.

Enfin, nous avons insisté sur le fait que la vulnérabilité ne doit pas être considérée comme un état statique. Elle est au contraire dynamique, puisque ses caractéristiques changent aussi bien dans le temps que dans l'espace. La prise en compte de ces deux aspects de la vulnérabilité implique d'identifier l'ensemble des facteurs pouvant mener à des variations temporelles de la vulnérabilité face à un aléa, d'identifier leurs effets sur la vulnérabilité mais aussi la durée de ces effets. Cela induit également de sélectionner avec soin l'échelle à laquelle l'analyse ou l'évaluation de la vulnérabilité est menée, mais également d'adapter au mieux la méthode d'évaluation utilisée, ainsi que ses indicateurs, aux caractéristiques de la zone analysée.

Au cours des vingt dernières années, un très grand nombre d'outils et de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation ont été développés. Il est possible de les différencier selon la manière dont les indicateurs qu'ils intègrent pour mesurer la vulnérabilité sont sélectionnés. Les approches déductives préfèrent sélectionner les indicateurs de vulnérabilité sur la base de théories établies de la vulnérabilité, sur la littérature existante ou encore à l'aide de l'avis d'experts. Ces approches sont particulièrement adaptées à l'analyse de la vulnérabilité dans les zones où ses caractéristiques sont déjà identifiées ou connues. A l'inverse, les approches inductives réalisent une sélection des indicateurs de vulnérabilité à l'aide d'approches statistiques. On peut considérer que ces approches sont davantage adaptées aux zones d'étude pour lesquelles les facteurs influençant la vulnérabilité ne sont pas entièrement compris et identifiés.

L'état de l'art a montré qu'il existe des différences notables entre les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité s'adressant aux phases de prévention et d'atténuation, voire de préparation de la gestion des risques, et celles s'orientant vers la phase d'intervention. Les premières évaluent la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation à l'aide d'indicateurs sociaux et économiques, et parfois à l'aide d'indicateurs relatifs à la vulnérabilité physique du bâti ou à la vulnérabilité économique. Les méthodes orientées vers la phase d'intervention sont plus diversifiées. Elles s'intéressent fréquemment à la planification des routes d'évacuation de la population vers les

refuges, aux conditions routières lors de l'évacuation ou encore à la localisation des refuges pour la population dans des zones sécuritaires. De nombreux outils ont également été développés dans le but d'évaluer le nombre de décès ou de personnes blessées au cours d'une inondation, en intégrant parfois certains des aspects mentionnés précédemment. C'est par exemple le cas d'outils comme le modèle LIFESim ou le Life Safety Model. Certains de ces outils ne tiennent pas compte de la vulnérabilité sociale de la population dans leurs analyses, alors même que celle-ci est largement reconnue comme un facteur déterminant du risque. C'est le cas par exemple du Life Safety Model. On peut également reprocher à ces études de ne fournir qu'une évaluation du nombre de décès ou de personnes blessées par un événement d'inondation dans une zone donnée. Elles ne permettent ainsi pas de localiser avec précision les personnes ayant besoin d'assistance lors de l'inondation. Une telle information pourrait cependant contribuer à réduire de manière importante les impacts humains et sociaux de l'inondation.

A l'inverse, les méthodes s'intéressant à l'évaluation des besoins d'assistance de la population lors du processus d'évacuation et intégrant les caractéristiques de la vulnérabilité sociale de la population ont parfois tendance à se limiter à cet aspect. Elles ne prennent ainsi pas en compte d'autres aspects déterminants pour la sécurité de la population lors de l'inondation, comme le type de bâtiment dans lequel la population se trouve, et qui détermine son exposition à l'aléa, mais aussi l'état des routes ou l'effet des systèmes d'alerte. A notre connaissance, un des rares outils intégrant ces différents aspects est le modèle « Flood Risk to People », qui permet de déterminer le nombre de personnes exposées à l'aléa, les pertes en vies humaines et les dommages corporels associés à une inondation. Malgré des avantages certains, ce modèle ne permet cependant pas de localiser avec précision les individus et les foyers les plus à risque lors de l'inondation, les résultats étant présentés par distance à la rivière ou par zone de récurrence. Il ne prend de plus pas en compte l'effet de l'inondation des routes permettant l'évacuation de la population, ce qui représente pourtant une information importante pour l'organisation de l'intervention.

Ces différentes remarques permettent de mettre en évidence certaines des caractéristiques de l'outil d'aide à la décision adapté à la phase d'intervention qui doit être développé dans le cadre de ce projet. L'objectif de cet outil n'est pas de fournir une estimation du nombre de décès ou de blessés liés à une inondation. Il doit plutôt permettre de localiser les personnes ou les foyers les plus à risque durant l'inondation, et qui pourraient avoir besoin d'assistance de la part des services impliqués dans l'intervention. Cet outil se doit donc de tenir compte non seulement de

la vulnérabilité sociale des personnes présentes dans la zone touchée par l'inondation, mais aussi de la manière dont ces personnes sont exposées à l'aléa. Plusieurs études ont montré que cela est possible en considérant les caractéristiques des bâtiments, qui permettent de déterminer si les personnes qui s'y trouvent peuvent avoir accès à un refuge ou à une zone sécuritaire durant l'inondation. Il semble également pertinent de tenir compte de l'effet de l'émission d'une alerte avant l'inondation, qui peut permettre à la population d'évacuer la zone avant l'arrivée des eaux.

La question du manque de ressources essentielles, par la défaillance ou la destruction par les eaux d'inondation des infrastructures produisant ces ressources, devrait également être explorée. Il conviendrait alors d'identifier les ressources dont le manque lors de l'inondation pourrait renforcer la vulnérabilité de la population, mais aussi de déterminer les effets à court et à moyen termes de ce manque de ressources sur la vulnérabilité de la population qui en dépend.

6. MÉTHODES D'ÉVALUATION ET DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE HUMAIN LIÉS À UNE INONDATION EN COURS

Ce sixième chapitre porte sur le développement des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours, dont les principales caractéristiques découlent des différentes remarques issues de l'état de l'art présenté au cours du chapitre 5. Il introduit en premier lieu l'ensemble des bases du développement de ces méthodes (section 6.1), qui a pu bénéficier de l'expertise de responsables municipaux et gouvernementaux de la sécurité civile du Québec. Les caractéristiques principales de l'organisation de l'intervention lors d'un sinistre seront tout d'abord présentées, afin de justifier le choix des différents experts interrogés dans le cadre de ces travaux (6.1.1). Les questionnaires soumis à ces experts, et portant sur les différents aspects des composantes de la vulnérabilité pouvant être intégrés à un outil d'évaluation de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation, seront ensuite présentés (6.1.2). Enfin, les réponses obtenues à ces questionnaires seront détaillées (6.1.3). La seconde section de ce chapitre s'intéresse aux données disponibles à grande échelle pour évaluer et cartographier les différentes composantes de la vulnérabilité (section 6.2). Elle a pour but d'identifier certains des aspects de la vulnérabilité qui ne peuvent être intégrés à une méthode applicable à un grand nombre de scénarios d'inondation, faute de données disponibles. Ces données seront détaillées pour chaque composante de la vulnérabilité intégrée à la méthode, à savoir la vulnérabilité socio-économique (6.2.1), l'exposition de la population (6.2.2) et la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles (6.2.3). Finalement, la troisième section du chapitre (section 6.3) présente les méthodes développées pour l'évaluation et la cartographie de ces trois composantes de la vulnérabilité (6.3.1 à 6.3.3) et du risque humain lié à une inondation en cours (6.3.4).

6.1 Bases du développement des méthodes

L'objectif principal de ces travaux de thèse est de développer un outil d'aide à la décision lors de la phase d'intervention, offrant aux responsables de la sécurité civile une évaluation et une cartographie précise du risque humain lié à une inondation en cours. L'état de l'art des

approches d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain lié aux inondations, présenté au Chapitre 5, a permis de mettre en relief les différents éléments qui devraient être intégrés à cet outil, à savoir l'exposition de la population au cours de l'inondation et sa vulnérabilité socio-économique. La fonctionnalité des infrastructures essentielles, et en particulier du réseau routier, devrait également être prise en compte, dans la mesure où le manque de certaines ressources produites par ces infrastructures peut renforcer la vulnérabilité de la population au cours de l'inondation. Enfin, l'effet de l'émission d'une alerte avant l'inondation, qui peut influencer la décision de la population d'évacuer la zone inondée, devrait également être intégrée. La prise en compte des autres composantes de la vulnérabilité, telle que la vulnérabilité politique, économique ou encore environnementale, n'est quant à elle pertinente que pour le développement d'approches de gestion des risques orientées vers les phases de prévention et d'atténuation.

Afin de valider l'intégration de ces différents aspects à l'outil d'aide à la décision, d'en définir les caractéristiques, puis de les adapter à l'environnement (population, bâtiments, infrastructures, etc.) auquel cet outil s'adresse, il a été jugé indispensable de consulter des experts en charge de la sécurité civile au Québec, et ayant l'expérience de la gestion de l'intervention lors d'une inondation.

6.1.1 Consultation d'experts en sécurité civile

Au Québec, la responsabilité de mettre en œuvre et de coordonner les interventions lors d'une inondation revient à la municipalité, à travers son Organisation Municipale de la Sécurité Civile (Organisation de la Sécurité Civile du Québec, 2008). La coordination des interventions dans la zone touchée, mais aussi en dehors de cette zone, est normalement assurée par le coordonnateur municipal de la sécurité civile, aussi appelé « directeur des opérations d'urgence ». Selon les municipalités, ce coordonnateur peut être un gestionnaire de sécurité incendie, des services de police, des travaux publics ou encore, pour les petites municipalités, un gestionnaire municipal. Lors de l'intervention, différents intervenants peuvent être engagés, comme par exemple les services de police, d'incendie, de santé, les services techniques et les travaux publics, etc. Un coordonnateur de site se charge de coordonner les activités de ces organisations, afin d'en assurer l'efficacité.

L'ampleur d'un sinistre est parfois telle que la municipalité ne peut y faire face seule. Elle peut alors faire appel aux ressources d'autres municipalités. Si ces ressources supplémentaires ne parviennent pas à répondre aux besoins générés par le sinistre, des ressources

gouvernementales (ministère de la Sécurité Publique, ministère des Transports, etc.), des organisations humanitaires (ex : Croix-Rouge) ou encore des fournisseurs de services, peuvent être impliqués dans l'intervention. La municipalité reste cependant à la tête de l'organisation de ses propres ressources sur son territoire.

Dans le but de multiplier les points de vue et les retours d'expérience sur la phase d'intervention lors d'une inondation, des responsables appartenant à différents services municipaux mais aussi des personnes impliquées au niveau gouvernemental, ont été interrogés. Des entretiens individuels ont ainsi été réalisés avec :

- Quatre coordonnateurs municipaux de la sécurité civile de villes ayant des populations variant entre environ 1 600 et 140 000 habitants, occupant respectivement les fonctions de :
 - directeur de service municipal de sécurité incendie,
 - directeur adjoint de service municipal de sécurité incendie,
 - directeur adjoint de municipalité,
 - chef des opérations de sécurité civile,

- Six conseillers régionaux en sécurité civile du ministère de la Sécurité Publique du Québec. Lors d'un sinistre, les conseillers régionaux collaborent avec les différents intervenants impliqués pour coordonner les ressources disponibles. Ils sont également chargés de conseiller les municipalités lors du développement et de l'amélioration de leurs plans d'intervention.

Ces dix entretiens ont été jugés suffisants pour rassembler l'ensemble des informations pertinentes pour cette partie du projet. En effet, les réponses aux questions posées ont peu varié d'un entretien à un autre, et cela qu'elle que soit la fonction de la personne interrogée et la taille de la ville dont il est en charge. Il n'a donc pas été jugé nécessaire de multiplier inutilement les entretiens avec des experts.

6.1.2 Développement de questionnaires à l'adresse des experts en sécurité civile

Comme on l'a déjà souligné, l'état de l'art des approches d'évaluation de la vulnérabilité a permis de mettre en avant un certain nombre de facteurs pouvant influencer le niveau de risque humain lors d'une inondation. Il s'agit :

- Des caractéristiques socio-économiques de la population,
- De l'exposition de la population à l'inondation,
- De la non-fonctionnalité de certaines infrastructures essentielles, et en particulier du réseau routier,
- De l'effet de l'émission d'une alerte sur l'évacuation de la population.

Il a ainsi été demandé aux responsables de la sécurité civile interviewés de valider l'intégration de ces quatre facteurs à l'outil d'aide à la décision, de définir les indicateurs permettant leur intégration, et enfin de déterminer les impacts de ces facteurs sur la vulnérabilité de la population au cours de l'inondation.

Les différents points de discussion ont été regroupés en trois questionnaires (Annexe V) portant respectivement sur :

- a) La vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation,
- b) L'exposition de la population à l'inondation
- c) La vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles.

Les questions portant sur la fonctionnalité du réseau routier au cours de l'inondation ont été incluses dans le troisième questionnaire, le réseau routier étant considéré comme une infrastructure produisant une ressource essentielle. Enfin, on doit souligner que l'effet de l'émission d'une alerte sur l'évacuation de la population n'a pas été inclus dans ces questionnaires. Il a cependant été abordé avec les personnes interrogées lors de discussions portant sur l'exposition de la population à une inondation en cours et sur l'implication des différents niveaux d'exposition en termes d'intervention. Les trois questionnaires développés ont en effet autant pour vocation de structurer les entretiens, dans le but d'obtenir l'ensemble des informations voulues, que de générer des discussions aboutissant à l'identification d'éléments ou de facteurs influençant la vulnérabilité de la population lors de l'inondation, et dont la prise en compte dans l'outil développé n'avait initialement pas été envisagée.

a) *Premier questionnaire: La vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation*

Il a été souligné dans la section 5.2.1 que l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique nécessite la sélection d'un ensemble d'indicateurs permettant de la caractériser au mieux. Une pré-sélection d'indicateurs a donc été réalisée, puis a été présentée aux experts interrogés. Cette pré-sélection a été faite sur la base de la littérature existante sur cet aspect de la vulnérabilité dans des zones aux caractéristiques socio-économiques similaires à celles du Québec. Elle s'est également inspirée des quelques documents portant sur la planification de la réponse au sinistre au Québec, et en particulier du document « Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités », développé par le ministère de la Sécurité Publique (2008). Les indicateurs de vulnérabilité socio-économique présélectionnés sont :

- Genre (femmes)
- Personnes âgées (65 ans et plus)
- Ménages monoparentaux
- Foyer à faibles revenus
- Personnes isolées (faibles réseaux sociaux ou familiaux)
- Absence d'expérience d'inondation dans la zone habitée
- Forte population immigrante (langue parlée différente de la langue officielle)
- Taux de chômage
- Nombre de véhicules par ménage
- Densité de population
- Locataire du logement
- Faible niveau d'éducation (pas d'étude après le secondaire)
- Personnes handicapées et malades de longue durée

Section 1 : Sélection des indicateurs de vulnérabilité socio-économique

Il a tout d'abord été demandé aux experts interrogés de sélectionner, au meilleur de leurs connaissances, les indicateurs de vulnérabilité les plus pertinents de cette pré-sélection, pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation au Québec. Il leur a ensuite été demandé de classer ces indicateurs par ordre d'influence sur la vulnérabilité, si cela leur semblait pertinent. Cette seconde question a pour objectif d'aider à la définition du poids pouvant être attribué à chaque indicateur sélectionné dans une méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique.

Section 2 : Méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique actuellement utilisée

Ce premier questionnaire intègre également une section portant sur la méthode (empirique, quantitative ou statistique) utilisée actuellement par les responsables de la sécurité civile interrogés pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population. Il est en effet possible que de telles méthodes aient été développées de manière ponctuelle par les responsables en sécurité civile, mais n'aient pas été largement diffusées. L'objectif de cette section est de prendre connaissance de l'existence et des caractéristiques générales de méthodes déjà utilisées localement au Québec pour évaluer la vulnérabilité de la population aux inondations mais n'ayant jamais fait l'objet de publications, pour éventuellement s'en inspirer. Il est aussi de susciter des discussions pouvant permettre de mettre en relief les insuffisances des méthodes déjà utilisées et ainsi de définir certaines des caractéristiques de l'outil d'aide à la décision qui doit être développé.

Section 3 : Échelle d'analyse de la vulnérabilité de la population

Les experts sont par la suite interrogés sur l'échelle à laquelle la vulnérabilité est analysée ou devrait idéalement l'être. Cette question unique doit permettre d'identifier l'échelle à laquelle la vulnérabilité de la population, mais aussi le risque humain lié à l'aléa inondation, doivent être analysés dans l'outil d'aide à la décision.

Section 4 : Sources de données

La dernière section de ce premier questionnaire s'intéresse aux sources de données à la disposition des experts en sécurité civile pour évaluer la vulnérabilité de la population, ainsi qu'aux données disponibles au niveau municipal et provincial qui pourraient être exploitées par l'outil d'aide à la décision qui sera développé.

Les résultats des entretiens sur ces différents aspects de la vulnérabilité socio-économique seront présentés à la section 6.1.3.

b) Second questionnaire: L'exposition de la population à l'aléa inondation

L'état de l'art présenté au Chapitre 5 a montré que l'exposition de la population à l'aléa inondation peut être déterminée à l'aide des caractéristiques des bâtiments dans lesquels la population se trouve au moment de l'inondation. Selon ses caractéristiques, un bâtiment peut en effet permettre à ses occupants de conserver des conditions de vie sécuritaires au cours de l'inondation et leur fournir un refuge en cas de montée importante des eaux. À l'inverse, certains types de bâtiments peuvent renforcer l'exposition de la population à l'inondation et éventuellement constituer une menace pour sa sécurité. Cela peut par exemple être le cas si le bâtiment n'offre pas de possibilité de refuge en cas de montée des eaux ou encore, dans certaines situations extrêmes, si la structure du bâtiment ne résiste pas à la pression exercée par les eaux.

Il est également important de considérer que l'exposition de la population peut varier au cours de l'inondation, et est ainsi dynamique. Par exemple, un bâtiment de plain-pied ayant un premier plancher surélevé peut permettre aux personnes se trouvant dans le bâtiment de conserver des conditions sécuritaires au début de l'inondation. Cependant, si le niveau de l'eau continue à augmenter, ce premier plancher peut être atteint par l'eau, ce qui fait fortement augmenter l'exposition des résidents à l'inondation.

Section 1 : Caractéristiques des bâtiments permettant d'évaluer l'exposition de la population au cours de l'inondation

Un ensemble d'indicateurs adaptés aux caractéristiques des bâtiments au Québec a été sélectionné à l'aide de la littérature existante, et plus particulièrement sur la base des travaux de Blin *et al.* (2005) et de Bonnifait (2005), qui se sont intéressés à l'évaluation des dommages engendrés par les inondations fluviales et par embâcles sur les bâtiments résidentiels. Les travaux de Robert *et al.* (2001), qui se sont penchés sur l'estimation des impacts des inondations en termes de nombre de population, de bâtiments et d'infrastructures touchés, pour la planification des mesures d'urgence, ont également été exploités. Les indicateurs sélectionnés sont des indicateurs de vulnérabilité physique, relatifs à la date de construction du bâtiment, au type de construction, ou encore au type de matériaux de construction du bâtiment, mais aussi des indicateurs structurels, relatifs à la hauteur du premier plancher, au nombre d'étages et enfin à la présence d'un sous-sol.

La présentation de ces indicateurs a tout d'abord pour objectif d'ouvrir la discussion sur les différents niveaux d'exposition de la population à l'inondation considérés par les experts, et sur leurs implications respectives en termes de sécurité pour la population et d'organisation de l'intervention. Ces discussions doivent mener à la sélection, avec l'aide des personnes interrogées, des caractéristiques de l'environnement bâti pouvant être mises à profit pour évaluer les différents niveaux d'exposition de la population à l'inondation.

Cette première section du questionnaire insiste également sur la question de l'inondation du sous-sol des bâtiments résidentiels. Au Québec, ceux-ci sont souvent aménagés et abritent des pièces de vie ou encore des équipements nécessaires à l'occupation du bâtiment (systèmes de chauffage, réservoir d'eau chaude, panneau électrique, etc.). Il a été demandé aux experts interrogés d'indiquer si, selon eux, l'inondation du sous-sol d'un bâtiment peut être considérée de la même manière que l'inondation du premier étage, en termes d'exposition des résidents et de risques pour leur sécurité. Enfin, il leur a également été demandé de classer, au meilleur de leurs connaissances, les caractéristiques de l'inondation d'un bâtiment selon leurs influences sur l'exposition de la population, du plus influent au moins influent.

Section 2 : Caractéristiques de l'aléa influençant le niveau de risque pour les résidents des bâtiments inondés

La seconde section du questionnaire s'intéresse aux caractéristiques de l'inondation d'un bâtiment pouvant être utilisées pour définir le niveau d'exposition de la population au cours de l'inondation. Plusieurs indicateurs ont été proposés, à savoir la simple présence d'eau dans le bâtiment, la hauteur d'eau dans le bâtiment, la durée de l'inondation du bâtiment, la vitesse des flots ou encore le moment auquel l'inondation se produit. Ces informations, croisées avec les caractéristiques des bâtiments présents dans la zone inondée, doivent permettre d'évaluer l'exposition de la population à l'échelle du bâtiment au cours de l'inondation.

Si les responsables en sécurité civile interrogés ont indiqué que les hauteurs d'eau dans le bâtiment et la durée de l'inondation ont une influence sur l'exposition de la population, il leur a été demandé d'indiquer les hauteurs d'eau ainsi que les paliers temporels induisant un risque particulier pour la sécurité des résidents. Il leur a également été demandé de préciser quels en sont les impacts en termes de sécurité pour les résidents des bâtiments, ainsi qu'en termes d'organisation de l'intervention.

c) *Troisième questionnaire: La vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles*

Le manque de certaines ressources essentielles peut faire augmenter de manière importante la vulnérabilité de la population au cours de l'inondation. Ce manque de ressources essentielles est dû à la défaillance ou à la destruction par l'inondation des infrastructures produisant ces ressources. Ces infrastructures sont désignées dans la littérature sous le terme « d'infrastructures essentielles », et peuvent être définies comme « des infrastructures nécessaires à un pays pour assurer la sécurité, la santé et le bien-être économique de ses citoyens, ainsi que le fonctionnement efficace de son gouvernement. Ces infrastructures peuvent prendre la forme d'une installation, d'un système, de réseaux, de technologies, de biens ou de services » (page 4, Sécurité Publique Canada, 2009).

Ces infrastructures essentielles sont particulièrement nombreuses et sont présentes dans un grand nombre de secteurs, dont la classification varie parfois selon les pays. Au Canada, 10 secteurs d'infrastructures essentielles sont généralement considérés (Sécurité Publique Canada, 2009) :

- Le gouvernement
- Les finances
- L'alimentation
- Le transport
- L'énergie et les services publics
- Le secteur manufacturier
- La santé
- L'eau
- La sécurité
- Les technologies de l'information et de la communication

Ces 10 secteurs sont considérés dans ce troisième questionnaire. Sur la base des travaux présentés par Robert *et al.* (2001), ils ont été classifiés en trois catégories pour être présentés aux experts interrogés. La première catégorie regroupe les infrastructures utiles à la gestion de l'intervention, alors que la seconde regroupe les infrastructures fournissant des services de base à la population. La troisième catégorie regroupe enfin l'ensemble des infrastructures ne s'intégrant pas aux deux premières catégories, mais dont la défaillance ou la destruction peut avoir des impacts majeurs sur le fonctionnement de la société.

Section 1 : Importance des infrastructures essentielles

Dans la première section de ce troisième questionnaire, il a tout d'abord été demandé aux experts de valider cette classification des infrastructures essentielles, puis d'indiquer quelle peut être l'importance de chaque infrastructure au sein de sa catégorie. L'objectif est ainsi de cibler les infrastructures dont la prise en compte dans l'outil d'aide à la décision est indispensable, mais aussi de définir si le manque de la ressource produite par cette infrastructure a un impact humain ou plutôt organisationnel.

Section 2 : Niveaux et conditions de fonctionnement des infrastructures essentielles

La seconde section du questionnaire s'est penchée sur les niveaux et conditions de fonctionnement des infrastructures essentielles. Dans les travaux présentés par Robert *et al.* (2001) la fonctionnalité d'une infrastructure essentielle est définie en quatre niveaux, à savoir :

- *Fonctionnelle* : infrastructure non touchée par l'inondation
- *Défaillance* : infrastructure peu touchée, mais ses activités sont perturbées
- *Non fonctionnelle* : infrastructure rendue inactive par l'inondation
- *Destruction* : infrastructure partiellement ou totalement détruite

Selon les auteurs, chacun de ces niveaux de fonctionnalité est lié à un niveau d'eau donné. Une infrastructure essentielle pouvant remplir plusieurs fonctions (un hôtel de ville peut par exemple regrouper trois fonctions liées à la gestion de crise, à savoir les télécommunications, les services municipaux et les services d'urgence), il est alors indispensable de définir le niveau d'eau associé à chacun de ces niveaux de fonctionnalité, et cela pour chaque fonction remplie par l'infrastructure.

Il a tout d'abord été demandé aux experts de valider ou d'invalider cette classification à 4 niveaux. Nous avons cependant jugé qu'une telle classification serait difficile à mettre en place dans un outil d'aide à la décision, puisqu'elle requiert de tenir compte des caractéristiques physiques de chaque infrastructure mais aussi de définir le niveau d'eau associé à chaque niveau de fonctionnalité de chacune des fonctions ou ressources produite par l'infrastructure. Une classification plus simple à deux niveaux, à savoir infrastructure « fonctionnelle » (la production de la ressource n'est pas perturbée) et infrastructure « non fonctionnelle » (la ressource n'est plus produite), a donc été proposée aux experts interrogés. Si cette classification simplifiée est validée, il leur est également demandé de préciser si c'est la simple

présence d'eau dans une infrastructure qui détermine l'arrêt de la production de la ou des ressources essentielles, ou si cet arrêt dépend de la hauteur d'eau dans l'infrastructure.

Section 3 : Submersion du réseau routier

La troisième section s'intéresse à la submersion du réseau routier. Le rôle important du réseau routier a en effet été souligné à plusieurs reprises, puisqu'il permet à la population de quitter la zone inondée et aux services de sécurité civile d'atteindre les personnes encore présentes dans cette zone. Il a ainsi été demandé aux personnes interrogées de définir à partir de quelles hauteurs d'eau sur la chaussée une route est généralement fermée à la circulation publique et aux véhicules de secours, respectivement. L'impact de l'isolement induit par l'inondation des routes sur la vulnérabilité de la population qui en dépend, ainsi que la manière dont cet isolement est pris en compte au cours de la phase d'intervention, ont également été abordés et discutés.

Section 4 : Impacts de l'absence d'approvisionnement des ressources essentielles au cours de l'inondation

Enfin, la dernière section s'est concentrée sur les impacts de l'absence d'approvisionnement de certaines ressources essentielles sur le bien-être et la sécurité de la population au cours de l'inondation. Il a tout d'abord été demandé aux experts de classer les ressources essentielles à la population selon l'importance de leur absence sur la santé et la sécurité de la population. L'objectif est ainsi d'identifier les infrastructures essentielles dont l'inondation entraîne une augmentation de la vulnérabilité de la population, mais également de quantifier cette augmentation. Enfin, le manque de certaines ressources essentielles peut être supportable s'il est de courte durée, mais peut finir par avoir des conséquences importantes pour la population s'il se prolonge dans le temps. Ainsi, il a été demandé aux personnes interrogées d'indiquer le palier de temps, en heures, après lequel l'absence de chaque ressource essentielle devient critique pour la sécurité et la santé de la population.

Les résultats des entretiens seront présentés dans la sous-section suivante.

6.1.3 Réponses obtenues aux questionnaires

Cette sous-section présente l'ensemble des réponses aux trois questionnaires obtenues au cours des entretiens avec les 10 responsables gouvernementaux et municipaux de la sécurité civile rencontrés. Ces réponses sont présentées par questionnaire, sous forme de synthèse.

a) *Réponses au premier questionnaire : La vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation*

Section 1 : Sélection des indicateurs de vulnérabilité socio-économique

Selon les experts interrogés, intégrer la vulnérabilité socio-économique de la population à un outil d'évaluation du risque humain est entièrement pertinent, puisque c'est un des facteurs aggravant les conséquences de l'aléa. Les entretiens menés sur ce point ont permis d'identifier 6 indicateurs permettant de caractériser la vulnérabilité socio-économique de la population aux inondations. Les experts interrogés ont choisi de ne sélectionner que des indicateurs ayant une « charge positive » sur la vulnérabilité, c'est-à-dire faisant augmenter la vulnérabilité de la population à l'aléa (Cutter *et al.*, 2003). La sélection de chacun de ces indicateurs a été justifiée par les personnes interrogées.

- *L'absence d'expérience d'inondation dans la zone habitée* : la plupart des responsables en sécurité civile interrogés soutiennent que les personnes vivant dans des zones inondables mais n'ayant jamais fait l'expérience d'une inondation dans cette zone ont généralement tendance à considérer que la municipalité ou le gouvernement ont la charge de la protection de leur maison, notamment par l'installation de sacs de sable et éventuellement de pompes. Cependant, cette charge revient bel et bien aux particuliers. Ces personnes ne mettent ainsi pas en place de mesures de protection du bâtiment ou de leurs biens matériels, ce qui fait augmenter les dommages, mais entraîne également des situations de détresse et de stress important lors de l'inondation, et des appels à l'aide.

Ces personnes n'ayant pas conscience de la présence de cet aléa, elles ont également tendance à ne pas vouloir évacuer leur logement de manière préventive. Cependant, elles sollicitent de manière presque systématique de l'aide pour évacuer une fois leur logement inondé.

A l'inverse, les individus ayant déjà fait l'expérience d'inondations vont plus souvent mettre en place des mesures d'adaptation et de protection (ex : installation de pompes au sous-sol, achat d'une génératrice permettant de fournir de l'électricité si le réseau Hydro-Québec est coupé localement, absence de compteurs électriques au sous-sol, achat d'une chaloupe, etc.), les rendant presque entièrement autonomes lors de l'inondation.

- *Les personnes locataires du logement* : selon les experts interrogés, les locataires vivent généralement depuis moins longtemps dans le logement que les personnes qui en sont propriétaires. Il est ainsi moins probable qu'ils aient connaissance de l'aléa dans la zone habitée ou qu'ils aient déjà vécu une inondation dans cette zone. Ils y sont donc souvent moins bien préparés. De plus, les locataires ont très peu tendance à mettre en place des mesures de protection ou d'adaptation du bâtiment, car ils estiment que les coûts de ces mesures sont à la charge du propriétaire du bâtiment ou du logement. Ces personnes sont donc généralement moins bien préparées mentalement et physiquement à l'inondation.

- *Les foyers à faibles revenus* : Les foyers à faibles revenus disposent de ressources financières limitées pour mettre en place des mesures de protection du bâtiment et de leurs biens. Leur exposition à l'inondation est donc souvent plus importante. Plusieurs experts interrogés ont également indiqué avoir observé que les foyers à faibles revenus ont plus de difficultés à retrouver des conditions de vie identiques à celles d'avant l'inondation, par manque de moyens financiers mais aussi de couvertures d'assurances plus limitées.

- *Les personnes handicapées et malades de longue durée* : Les personnes handicapées et malades de longue durée ont des capacités physiques très réduites pour protéger le bâtiment et leurs biens contre l'inondation, ce qui les rend généralement plus exposées à l'aléa. Elles sont de plus moins résistantes au stress que peut provoquer l'inondation, et sont plus susceptibles de développer des pathologies d'origine hydrique (infections respiratoires, problèmes gastro-intestinaux, etc.). Enfin, ces personnes ayant une mobilité réduite, il est rare qu'elles puissent évacuer seules leur résidence. Leur évacuation nécessite ainsi l'assistance de plusieurs personnes, que ce soit des membres de la famille ou des intervenants externes (pompiers, sécurité civile, etc.), et est souvent longue.

Les foyers ou centres de santé pour les personnes handicapées ont pour obligation de développer des plans de mesures d'urgence, dans lequel les mesures d'évacuation des résidents doivent être entièrement définies et planifiées. Nous supposons donc leur autonomie en termes d'évacuation lors d'une inondation, bien qu'une aide de la municipalité ou encore des services d'incendie ne soit pas à exclure.

- *Les personnes âgées (65 ans et plus)* : Selon les experts interrogés, les personnes âgées peuvent présenter des difficultés de mobilité qui vont ralentir leur capacité à se préparer avant l'inondation mais aussi à évacuer durant l'inondation. Elles auront ainsi besoin de l'aide de membres de leur famille ou des services de sécurité civile pour évacuer leur résidence. Elles sont également plus sensibles aux pathologies d'origine hydrique liées à l'inondation que les personnes plus jeunes. Les experts disent également avoir remarqué que les personnes âgées ont moins tendance à accepter d'évacuer leur résidence, en grande partie par peur des vols en leur absence. On doit souligner que l'âge de 65 ans définissant l'appartenance à la catégorie « personnes âgées » a été discuté par plusieurs experts, et qu'il a été difficile de parvenir à un consensus sur ce point. Certains experts considèrent ainsi que l'âge de 75 ans pourrait être plus adapté, et suivent en cela les réserves du ministère de la Sécurité Publique du Québec quant à cet aspect de la vulnérabilité des individus.

- *Les personnes vivant seules ou ayant de faibles réseaux sociaux* : Les personnes vivant seules et/ou ayant de faibles réseaux sociaux dans la municipalité et dans le voisinage sont seules pour protéger leurs biens et leurs maisons durant l'inondation, ce qui peut réduire l'efficacité de ces mesures. De plus, ces personnes disposent de moins de solution de relogement au cours de l'inondation, et peuvent avoir tendance à ne pas vouloir quitter leur logement. On doit cependant souligner que cet indicateur de vulnérabilité n'a pas été relevé par toutes les personnes interrogées. Certains coordinateurs municipaux de la sécurité civile de municipalités de petite taille (moins de 6 000 habitants) ont en effet souligné que les personnes sont rarement entièrement isolées, et que l'entraide est souvent bien présente lors d'une inondation.

Les indicateurs précédemment cités ont été classifiés par les coordonnateurs municipaux et les conseillers régionaux en sécurité civile, selon leur influence sur la vulnérabilité socio-économique. Cette classification varie parfois d'une personne interrogée à une autre. La classification des indicateurs qui est présentée au Tableau 6.1 est ainsi une synthèse, réalisée sur la base de la fréquence d'observation de chaque indicateur par rang.

Tableau 6.1: Classification des indicateurs de vulnérabilité socio-économique, selon leur influence sur la vulnérabilité

Influence*	Indicateur
1	Absence d'expérience d'inondation dans la zone habitée
2	Personnes handicapées ou malades de longue durée
3	Personnes âgées (65 ans et plus)
4	Locataire du logement
5	Foyers à faibles revenus
6	Personnes isolées
<i>(*) du plus influent au moins influent</i>	

L'absence d'expérience d'inondation dans la zone habitée a été citée de manière quasi-unanime comme l'indicateur ayant la plus forte influence sur la vulnérabilité socio-économique de la population à l'inondation. Si les handicaps et les maladies de longue durée sont placés au second rang, on doit toutefois souligner que de nombreux experts considèrent que cet indicateur a un poids équivalent à celui de l'indicateur « personnes âgées (65 ans et plus) », qui est ici placé au troisième rang. L'indicateur « locataire du logement » est placé au quatrième rang, mais a été placé à quelques reprises après l'indicateur « foyers à faibles revenus ». Leurs poids dans une méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique devraient donc être proches. Enfin, les personnes isolées ou vivant seules sont placées au dernier rang, cet indicateur n'ayant pas été cité de manière systématique par les personnes interrogées.

Section 2 : Méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique actuellement utilisée

L'analyse et l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation est entièrement basée sur une analyse empirique et intuitive. Au cours des entretiens, il est apparu qu'aucun outil n'a pour le moment été développé pour estimer cette composante majeure du risque, et cela aussi bien au niveau municipal qu'au niveau provincial.

Les coordonnateurs municipaux, et dans une plus faible mesure les conseillers régionaux, se basent avant tout sur leur connaissance des zones inondables, des personnes qui y vivent et sur les échanges avec ces personnes, pour localiser les personnes les plus vulnérables et déterminer si elles ont besoin d'assistance.

Cependant, plusieurs des personnes interrogées ont indiqué que le développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique basée sur une analyse statistique leur serait utile. Elle leur permettrait en effet de localiser précisément les personnes les plus vulnérables, de communiquer avec ces personnes avant ou durant l'inondation, et ainsi de mieux évaluer les besoins au cours de la phase d'intervention.

Section 3 : Échelle d'analyse de la vulnérabilité de la population

Il a été demandé aux personnes interrogées de préciser l'échelle à laquelle l'information sur la vulnérabilité de la population, et par extension sur le risque humain, devrait leur être transmise. La réponse la plus fréquemment obtenue est la parcelle, puisqu'elle permet une localisation précise des foyers vulnérables. On a pu remarquer que l'unité de logement n'a été que très peu mentionnée. Cela a été justifié par le fait que la grande quantité d'information produite par l'utilisation de cette échelle d'analyse pourrait dans certains cas complexifier l'interprétation des résultats (par exemple dans le cas de quartiers constitués d'immeubles à logements multiples) et ainsi la prise de décision.

Section 4 : Sources de données

Aucun outil n'étant à ce jour utilisé de manière opérationnelle par les municipalités et le gouvernement pour évaluer la vulnérabilité de la population québécoise à l'aléa inondation, les personnes interrogées n'avaient que peu d'informations à fournir sur l'éventuelle disponibilité de données sociales et économiques à une échelle plus fine que celle de l'aire de diffusion de Statistiques Canada. Il semble que certains Centres de Santé et de Services Sociaux aient des informations sur l'état de santé de la population, mais que de telles données ne sont pas aisément disponibles pour toutes les municipalités. Les listes électorales permettraient également d'obtenir les noms, âges et adresses d'un certain nombre de personnes, à condition que celles-ci y soient inscrites et soient en âge de voter. Pour la plupart des personnes interrogées, les données de Statistiques Canada sont les plus complètes et les plus fiables, même si elles ne permettent pas d'obtenir une information précise à l'échelle du bâtiment.

b) Réponses au second questionnaire : L'exposition de la population à l'aléa inondation

Les entretiens réalisés sur la question de l'exposition de la population à l'aléa inondation ont été l'occasion de discuter avec les différents experts en sécurité civile d'un des aspects importants de la phase d'intervention, à savoir de la manière dont l'évacuation de la population se déroule avant et au cours d'une inondation.

Les niveaux d'eau et les débits de la rivière sont étroitement surveillés par les services municipaux, au cours des périodes de crues mais aussi quand les conditions météorologiques sont favorables à la formation d'inondations. De nombreuses municipalités font également appel aux services d'entreprises privées spécialisées dans la surveillance et la prévision des crues, qui leur transmettent des cartes de surveillance en temps réel ou encore des bulletins de veille et des alertes hydrologiques. Lorsqu'une inondation est attendue, un avertissement est donné de manière préventive à la population par la municipalité. Les résidents des zones pouvant être affectées ont ainsi le temps d'évacuer ou de mettre en place les quelques mesures pouvant ralentir l'entrée de l'eau dans le bâtiment (ex : obstruction des ouvertures exposées à l'eau, mise en place de pompes, etc.).

Malgré ces efforts de prévention, les conseils d'évacuation ne sont pas toujours respectés. Il n'est en effet pas rare que des résidents ne veuillent pas quitter leur logement, le plus souvent à cause des vols qui pourraient s'y produire en leur absence mais aussi pour s'assurer du bon fonctionnement des mesures de protection contre les eaux mises en place. Tenir compte de l'effet de l'émission d'une alerte ou d'un avertissement à la population dans l'évaluation du risque semble ainsi difficile, puisque cet effet varie selon les individus.

Malgré l'émission d'alertes préventives, les responsables en sécurité civile s'attendent donc à recevoir des demandes d'aide à l'évacuation au cours de l'inondation. Les personnes interrogées ont souligné que ces demandes d'aide sont le plus souvent fonction du sentiment de sécurité que la population peut conserver dans le logement. De manière générale, ce sentiment est lié à l'exposition directe de la population aux eaux d'inondation, c'est-à-dire aux étages de vie touchés et éventuellement à la disponibilité d'un refuge.

Les résidents d'un bâtiment dont seul le sous-sol est atteint par l'eau conservent souvent un sentiment de sécurité assez élevé, puisque le premier plancher du bâtiment, qui est très souvent le plancher de vie, n'est pas touché. Ils ont ainsi tendance à ne pas évacuer le bâtiment. Ce

sentiment de sécurité disparaît quand le premier plancher du bâtiment est atteint par l'eau. Les résidents du bâtiment vont alors très souvent décider de quitter le bâtiment. Si le premier plancher est atteint par l'eau, il est très probable que la hauteur d'eau à l'extérieur du bâtiment ne permette pas aux véhicules privés de circuler. Les résidents font alors généralement appel aux services municipaux ou aux services de sécurité publique afin d'obtenir de l'aide pour évacuer, à l'aide de matériel adapté. Certains experts ont également souligné que le sentiment d'insécurité des résidents est nettement renforcé quand le bâtiment ne possède pas de second étage leur offrant un refuge en attendant de l'aide pour évacuer.

Section 1 : Caractéristiques des bâtiments permettant d'évaluer l'exposition de la population au cours de l'inondation

Les experts en sécurité civile rencontrés ont tous confirmé que la date de construction du bâtiment, le type de construction du bâtiment et le type de matériaux de construction ne sont pas utiles pour évaluer l'exposition de la population à une inondation fluviale. Ces indicateurs sont en effet des indicateurs de vulnérabilité physique, permettant de déterminer la résistance du bâtiment aux eaux d'inondation, et ainsi la mise en péril des individus présents dans des bâtiments partiellement ou entièrement endommagés par l'inondation (voir les exemples présentés à la section 5.2.4). Dans le cas des inondations fluviales, qui sont au centre de ces travaux, les effondrements de bâtiments ou les dommages pouvant mettre en péril les résidents au cours de l'inondation sont extrêmement rares.

A l'inverse, et d'après les remarques faites précédemment, la hauteur du premier plancher et la présence d'un sous-sol du bâtiment peuvent être mis à profit pour évaluer l'exposition de la population à l'inondation.

- *L'élévation du premier plancher du bâtiment* : elle va permettre de déterminer si le premier plancher du bâtiment est atteint ou non par l'eau au cours de l'inondation. Un premier plancher non surélevé ou peu surélevé sera en effet plus rapidement atteint par l'eau qu'un premier plancher surélevé. Il s'agit là d'une caractéristique importante à prendre en compte en vue de l'application de l'outil au Québec, où la présence d'un sous-sol dans de très nombreux bâtiments induit la surélévation du premier plancher de plusieurs dizaines de centimètres.

- *La présence d'un sous-sol* : le sous-sol est le premier élément d'un bâtiment pouvant être touché par l'inondation, quand celui-ci en possède un. Comme on l'a déjà souligné, il est assez rare que les résidents d'un bâtiment dont seul le sous-sol est inondé acceptent d'évacuer le

bâtiment, leur sentiment de sécurité restant élevé. Cependant, les experts considèrent que la présence d'eau dans le sous-sol d'un bâtiment résidentiel peut constituer un risque pour la sécurité de la population, à cause du danger d'incendie ou d'électrocution dus à l'inondation des installations électriques et de chauffage fréquemment situées au sous-sol.

Le nombre d'étages ne semble pas être considéré comme le déterminant majeur de l'exposition de la population à l'inondation. Les experts considèrent en effet que l'inondation du premier plancher du bâtiment représente un très fort niveau d'exposition, induisant de manière quasi-systématique la sortie de la population du bâtiment. Cette caractéristique des bâtiments n'a donc pas été exploitée.

Les réponses aux questions portant sur l'inondation du sous-sol des bâtiments ont déjà été présentées partiellement. Pour les experts, la présence d'eau dans le bâtiment, que ce soit au sous-sol ou sur le premier plancher, entraîne une forte exposition de la population à l'inondation. Dans les deux cas, l'évacuation de la population devrait être systématique, puisque sa sécurité n'est plus garantie. Ainsi, l'inondation du sous-sol d'un bâtiment devrait le rendre automatiquement inhabitable. Cela ne dépend donc pas de la fonctionnalité des sources d'énergie et du réseau d'eau potable du bâtiment, ou encore de la saison. Les discussions avec les experts ont cependant permis de révéler que le niveau d'exposition de la population peut être considéré comme plus élevé quand le premier plancher du bâtiment est inondé que quand seul le sous-sol est inondé.

Section 2 : Caractéristiques de l'aléa influençant le niveau d'exposition pour les résidents des bâtiments inondés

Parmi l'ensemble des caractéristiques de l'aléa pouvant influencer le niveau d'exposition pour les résidents des bâtiments inondés, seule la simple présence d'eau dans le bâtiment a été retenue par l'ensemble des experts en sécurité civile interrogés.

Ainsi, la hauteur d'eau dans le bâtiment ne semble pas avoir d'importance. Selon les personnes interrogées, la durée de l'inondation du bâtiment, ainsi que la vitesse des flots, sont avant tout des indicateurs permettant d'évaluer les dommages aux bâtiments, mais pas le niveau de risque pour la population. Quelques experts ont également souligné que le moment où l'inondation arrive peut avoir un impact sur le niveau de risque. Quand une inondation arrive au cours de la nuit, l'effet de surprise est souvent important et les résidents ont tendance à paniquer d'avantage et à multiplier les appels à l'aide. De plus, si un avertissement ne leur a pas été

donné dans la journée précédente ou dans la soirée, les résidents n'ont généralement pas eu le temps de mettre en place des mesures de protection. Cependant, certains experts soulignent qu'une inondation ayant lieu au milieu de la journée, alors que les résidents sont au travail, ne permet pas non plus de mettre en place des mesures de protection. Selon eux, la différenciation jour/nuit ne semble pas entièrement justifiée.

c) Réponses au troisième questionnaire : la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

Section 1 : Importance des infrastructures essentielles

Les responsables de la sécurité civile interrogés dans le cadre de ce projet ont validé la manière de classer en trois catégories les infrastructures essentielles. Chacune de ces catégories regroupe en effet des infrastructures ayant des impacts particuliers en termes de gestion de l'intervention.

- *Les infrastructures de gestion de l'intervention* : elles sont indispensables à la bonne organisation et au bon déroulement de l'inondation. L'hôtel de ville, les casernes de pompiers, les postes de police, les centres de communication d'urgence 911, les centres et réseaux téléphoniques, ainsi que l'ensemble du réseau routier, sont les infrastructures les plus importantes de cette catégorie. Cette liste devrait également intégrer les services de travaux publics, les services techniques et les garages municipaux, qui sont en charge de la signalisation routière lors de l'inondation et dans lesquels les engins pouvant servir aux interventions dans les zones inondées sont entreposés.

Il est important de souligner que si certains de ces services se trouvent en zone inondable, leur relocalisation dans une zone protégée et ne pouvant être isolée par l'inondation doit être prévue par le plan de sécurité civile mis en place par la municipalité. C'est le cas en particulier de l'hôtel de ville, qui sert souvent de centre de coordination, des casernes de pompiers, des postes de police et des centres de communication d'urgence 911.

Selon les experts interrogés, le fait que ces infrastructures soient inondées ne fait pas augmenter le niveau de risque pour la population, puisque des services de remplacement sont le plus souvent prévus. En revanche, cela peut compliquer l'organisation de l'intervention. L'outil développé dans le cadre de ce projet ne s'intéresse pas à l'évaluation de l'impact de la

défaillance de ces infrastructures sur l'organisation de l'intervention, mais uniquement au niveau de risque humain. Il apparaît cependant pertinent que l'outil de cartographie dynamique du risque indique les infrastructures de gestion de l'intervention atteintes par l'inondation.

- *Les infrastructures fournissant des services de base à la population* : les discussions portant sur les infrastructures fournissant des services de base à la population ont montré que le réseau routier est considéré comme l'infrastructure essentielle fournissant la ressource la plus importante pour la population au cours de l'inondation. L'explication qui a été donnée de manière systématique est qu'en cas de problème de santé majeur, les individus se trouvant dans des zones isolées à cause de l'inondation ne peuvent pas être atteints dans des délais corrects par les services de secours. Il est ainsi considéré que leur sécurité n'est plus garantie. Ainsi, et c'est un point important, les experts rencontrés ont indiqué que les personnes se trouvant dans un bâtiment non inondé mais isolé à cause de l'inondation, doivent être évacués.

Parmi les autres infrastructures fournissant des services de base à la population, certaines personnes ont souligné l'intérêt de tenir compte de la perte de capacité des infrastructures fournissant de l'électricité et de l'eau potable à la population.

- *Les autres infrastructures essentielles* : l'ensemble des institutions d'enseignement et de garde d'enfants, ainsi que toutes les institutions de santé (les hôpitaux, les foyers pour personnes âgées, les centres locaux de services communautaires, etc.) sont considérées comme des infrastructures très importantes. Ces institutions devraient être prévenues le plus tôt possible de l'arrivée d'une inondation, afin de pouvoir mener à bien leur évacuation, telle que prévue dans leur plan de mesures d'urgence. Si leur évacuation n'a pas pu être réalisée avant le début de l'inondation, l'aide des pompiers et des services municipaux va s'avérer être indispensable. C'est donc un élément important à prendre en compte dans l'organisation de l'intervention, puisqu'il risque de monopoliser un grand nombre de personnes.

Les experts interrogés ont souligné qu'il serait important que la cartographie du risque tienne compte de ces infrastructures, et les indique clairement lorsque celles-ci sont touchées par l'inondation.

Section 2 : Niveaux et conditions de fonctionnement des infrastructures essentielles

Une échelle de fonctionnalité des infrastructures essentielles, composée de 4 niveaux (fonctionnelle, défaillance, non fonctionnelle et destruction) a été proposée aux experts rencontrés. Selon eux, cette classification est trop détaillée : une infrastructure a la capacité de

fournir une ressource ou ne l'a pas. Une classification de type « fonctionnelle » (la production de la ressource n'est pas perturbée) et « non fonctionnelle » (la ressource n'est plus produite) leur semble ainsi beaucoup plus appropriée et plus facilement interprétable.

Ils considèrent également qu'une infrastructure inondée est une infrastructure « non fonctionnelle », puisque certains de ses services seront automatiquement perturbés. Cela ne dépend pas de la hauteur d'eau dans l'infrastructure, mais uniquement de la présence d'eau dans celle-ci. La justification qui est fréquemment donnée est que la plupart des infrastructures fonctionnent grâce à de l'électricité, qui doit être coupée pour des raisons de sécurité quand l'eau entre dans l'infrastructure.

Section 3 : Submersion du réseau routier

Les experts en sécurité civile interrogés ont indiqué que selon eux, une route devrait être fermée à la circulation publique dès qu'elle est inondée, et cela quelle que soit la hauteur d'eau sur la chaussée. La présence d'eau sur la chaussée, même peu importante, peut en effet masquer la présence de trous dans la chaussée, dus notamment au déplacement des plaques d'égouts par la pression de l'eau. Cela peut constituer un danger important, aussi bien pour la circulation publique que pour les véhicules de secours. L'eau peut également endommager la route, qui devient alors dangereuse pour la circulation. Plusieurs personnes ont également précisé que la circulation des véhicules sur les routes inondées peut engendrer la formation de vagues, qui viennent taper contre les fenêtres des sous-sols et des caves des bâtiments situés le long des routes. Il n'est ainsi pas rare que les fenêtres se brisent et que l'eau s'infilte dans le bâtiment.

La fermeture des routes est une décision qui est prise par la municipalité. Certaines municipalités ferment les routes à la circulation dès que l'inondation atteint la chaussée alors que d'autres ferment la circulation à partir d'une certaine hauteur d'eau, définie selon leurs propres critères. Il semble donc difficile de définir une hauteur d'eau menant à la fermeture d'une route applicable à l'ensemble des scénarios d'inondations.

La circulation des véhicules de secours sur les routes inondées est un point particulier et encore peu clair. Les véhicules des services d'incendie, qui sont souvent surélevés, vont pouvoir circuler sur des routes où la hauteur d'eau ne permet plus la circulation des véhicules privés. Les services d'ambulance ne tolèrent qu'une faible hauteur d'eau. Dans les deux cas cependant, la circulation des véhicules de secours sur des routes inondées est à éviter, pour des questions de sécurité. Plusieurs personnes ont quand même indiqué que des

renseignements sur la hauteur d'eau maximale sur les sections de chaussée inondée pourraient être utiles, afin d'évaluer si les véhicules de secours à leur disposition peuvent circuler ou non.

Enfin, et comme on l'a déjà souligné dans la section 1 de ce questionnaire, l'isolement de la population induit par l'inondation des routes fait augmenter la vulnérabilité de la population, et cela même si elle se trouve dans un bâtiment non inondé. Dans ce cas, on demande à la population d'évacuer le bâtiment.

Section 4 : Impacts de l'absence d'approvisionnement des ressources essentielles au cours de l'inondation

La dernière section de ce questionnaire porte sur les impacts de l'absence d'approvisionnement de certaines ressources essentielles lors de l'inondation. Deux ressources essentielles ont été précédemment identifiées par les personnes interrogées. Il s'agit de l'électricité et de l'eau potable.

Selon les experts consultés, le manque de ces ressources ne constitue pas une raison d'évacuer le bâtiment. Seule la présence d'eau dans celui-ci devrait induire une évacuation. De plus, les personnes résidant en zone inondable sont informées par la municipalité de la nécessité d'avoir à disposition une « Trousse d'urgence 72 heures », c'est-à-dire un ensemble d'articles considérés comme essentiels. Ces articles doivent permettre à la population de se débrouiller sans source d'énergie ni eau courante potable durant au moins 72 h, le temps que les intervenants des services d'urgence aident les personnes ayant des besoins urgents. Le gouvernement du Canada a d'ailleurs mis en ligne une liste des éléments que doit contenir cette trousse (Gouvernement du Canada, 2016). Le fait qu'une telle trousse soit disponible dans chaque foyer n'est cependant pas garanti et de loin.

- *L'absence d'électricité* : elle est considérée comme la ressource dont l'absence peut éventuellement avoir le plus de conséquences sur le bien-être de la population. Il est généralement considéré que l'absence d'électricité peut avoir des conséquences sur le bien-être de la population après 72 h en été et après 48 h en hiver. Plusieurs personnes ont également souligné qu'en l'absence d'électricité, les téléphones sans fil et les cellulaires, qui sont maintenant très communs dans les foyers, peuvent ne plus fonctionner après environ 48 h. Les résidents des zones inondées peuvent alors rencontrer des difficultés à communiquer avec les services d'urgence et de secours.

- *L'eau potable* : en cas d'interruption du service d'eau potable, des mesures de distribution d'eau doivent être prises par la municipalité. Il peut cependant être difficile d'acheminer cette eau dans les zones inondées. Après 48 h, l'absence totale d'eau potable est considérée comme critique pour la santé de la population.

6.2 Données disponibles pour l'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité

Cette seconde sous-section présente l'ensemble des données qui ont été utilisées pour développer la méthode d'évaluation de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation adaptée aux besoins identifiés par les différents experts consultés. La méthode ayant été développée et testée au Québec, l'ensemble des données présentées sont celles disponibles dans la province. Il a été choisi de présenter les données disponibles pour évaluer chaque aspect de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation et pour la cartographier avant de présenter la méthode d'évaluation elle-même. Cela permet en effet de cibler certaines des composantes de la vulnérabilité identifiées par les experts qui ne pourront pas être intégrées par la suite à la méthode d'évaluation, faute de données adaptées. Le Tableau 6.2 recense l'ensemble des données disponibles pour l'évaluation de chaque composante de la vulnérabilité, et présente les sources, l'échelle spatiale ainsi que le format initial de ces données.

Tableau 6.2: Données disponibles pour l'évaluation de chaque composante de la vulnérabilité

	Données	Sources	Échelle	Format
Vulnérabilité socio-économique	Recensement 2011 et ENM 2011	Statistique Canada	Aire de diffusion	Tabulaire (format .ivt ou .xml)
	Limites des aires de Diffusion	Statistique Canada	Aire de diffusion	Polygone (fichier de forme)
Exposition de la population	Rôle d'évaluation foncière	Municipalité	Unité d'évaluation (bâtiment)	Tabulaire (format .xml ou .xls)
	Forme des bâtiments	Municipalité, MRC ou utilisateur si non disponible	Bâtiment	Polygone (fichier de forme)
	Plan cadastral	Municipalité, ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec	Lot cadastral	Polygone (fichier de forme)
	Hauteurs d'eau	Utilisateur (méthode de cartographie de l'aléa inondation, chapitre 3)	Par pixel	Matriciel (raster)
Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles	Forme des infrastructures essentielles	Municipalité, MRC, Base de données topographiques du Québec	Bâtiment	Polygone (fichier de forme)
	Réseau routier	Base Nationale de Données Topographiques (Ressources Naturelles Canada)	Segment de route, échelle 1/20 000	Vecteur (fichier de forme)
	Hauteurs d'eau	Utilisateur (méthode chap. 3)	Par pixel	Matriciel (raster)

6.2.1 Données disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population

a) Données de Statistique Canada

L'intégration des indicateurs de vulnérabilité socio-économique identifiés par les différents experts en sécurité civile, et présentés à la section 6.1.3, requiert la disponibilité de données sur la population à une échelle fine, qui est celle du bâtiment. Afin d'être applicable au plus grand nombre de cas d'étude possible, ces données doivent de plus être disponibles pour toutes les municipalités du Québec.

Nos recherches mais aussi nos entretiens avec les experts en sécurité civile ont montré que certains services municipaux, les Centres de Santé et de Services Sociaux (CSSS) ou encore les Centres Locaux de Services Communautaires (CLSC) peuvent posséder une partie de ces données. Cependant, la manière dont elles sont collectées, les caractéristiques de la population qui sont ciblées, mais aussi le format des données, peuvent grandement varier d'une municipalité à une autre. L'accès à ces données devrait de plus se faire municipalité par municipalité. Enfin, leur formatage en vue de leur utilisation dans un outil d'évaluation de la vulnérabilité peut être un processus long et complexe.

Les données issues du recensement de Statistique Canada, plus complètes et disponibles gratuitement pour l'ensemble des municipalités du Canada, dans un même format de données et mises à jour aux cinq ans, ont ainsi été préférées (Statistique Canada, 2016a). Une des limites principales de ces données de recensement est qu'elles ne sont disponibles que par aire de diffusion (AD), qui regroupe généralement de 400 à 700 personnes, et pas à l'échelle du bâtiment. Elles peuvent également contenir des imprécisions, dues à des erreurs lors de la réponse au questionnaire de recensement, à des erreurs de couverture des questionnaires ou à des erreurs de traitement des données (Statistique Canada, 2016b). Elles permettent cependant d'obtenir des informations précises sur les tendances sociales et démographiques de la population, dans une zone relativement peu étendue. Les données disponibles les plus récentes au moment du développement du modèle d'évaluation de la vulnérabilité étaient celles du recensement de 2011.

L'ensemble des données nécessaires à l'intégration des indicateurs de vulnérabilité socio-économique sélectionnés par les experts en sécurité civile n'étant pas disponibles dans les données de recensement de la population de 2011, il a été nécessaire d'utiliser les données de

l'Enquête Nationale auprès des Ménages (ENM) réalisée en 2011 par Statistique Canada. L'ENM est une enquête à participation volontaire, qui a remplacé en 2011 le questionnaire complet obligatoire utilisé au cours des recensements précédents. Ces deux questionnaires ont un contenu très semblable, leur différence majeure résidant dans le caractère volontaire de la version 2011 de l'ENM. L'ENM 2011 a été distribué à environ un ménage canadien sur trois plutôt qu'à un ménage sur 5, comme c'était jusque-là le cas pour le questionnaire complet (Statistique Canada, 2013). Étant donné ce taux de distribution et les taux assez élevés de non-réponse au Québec (environ 30%), il existe de grandes réserves quant à la qualité des données de l'ENM 2011 disponibles pour tester l'approche proposée. Cependant, il faut savoir que la formule de l'ENM 2011 n'a pas été réappliquée lors du recensement de 2016, et que le questionnaire long obligatoire a été de nouveau instauré par Statistique Canada. On suppose donc que ces nouvelles données de recensement, qui peuvent être utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité dans de futurs scénarios d'inondation, sont de meilleure qualité.

b) Prétraitement des données de recensement et de l'ENM de Statistique Canada

Les données de recensement de 2011 ainsi que les données de l'ENM 2011 ont été transmises par Statistique Canada sous forme tabulaire, en format .ivt. Il s'agit d'un format de fichiers de données associé au logiciel Beyond 20/20, un logiciel de visionnement de données qui ne permet pas le traitement direct des données. Il est ainsi nécessaire d'exporter les données utiles en format de données .xls, associé au logiciel Excel de Microsoft. Les données utiles à l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique sont présentées au Tableau 6.3. On doit souligner que l'indicateur « personnes handicapées et malades de longue durée » a été écarté faute de données fournies par Statistique Canada.

Tableau 6.3: Données de recensement et de l'ENM 2011 utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique

Données (champs)	Indicateur de vulnérabilité représenté	Source
Code de l'AD	-	Recensement 2011
Population totale de l'AD	-	Recensement 2011
Personnes ayant déménagé (1 an auparavant)	Absence d'expérience d'inondation dans la zone habitée	ENM 2011
Locataire	Personne locataire du logement	ENM 2011
Ayant un faible revenu en 2010 fondé sur la mesure de faible revenu après impôt (MFR-Apl)	Foyers à faibles revenus	ENM 2011
Addition des données des champs :		
- 65 à 69 ans	Personnes âgées (65 ans et plus)	Recensement 2011
- 70 à 74 ans		
- 75 à 79 ans		
- 80 à 84 ans		
- 85 ans et plus		
Ménages comptant une seule personne	Personnes vivant seules ou ayant de faibles réseaux sociaux	Recensement 2011

c) Limites des aires de diffusion de recensement

Enfin, afin de pouvoir lier les données de recensement et de l'ENM à une zone géographique, il est nécessaire de disposer de données représentant les limites géographiques de chaque AD contenue dans la zone d'étude. Cette information est disponible gratuitement sur le site Internet

de Statistique Canada pour le recensement de 2011, et peut être transmise sous forme de « fichier de forme » (ou shapefile) (Statistique Canada, 2015). Chaque AD est représentée par un polygone, suivant précisément les limites de cette AD. Le code permettant l'identification de l'AD est renseigné dans la table attributaire liée au fichier de forme. Ces données sont transmises dans le système géodésique de référence nord-américain de 1983 (NAD83), qui est le système géodésique utilisé pour l'ensemble des données géographiques utilisées dans ces travaux. Aucune reprojection de ces données ne devrait donc être requise.

6.2.2 Données disponibles pour l'évaluation de l'exposition de la population

a) Rôle d'évaluation foncière

Les entretiens réalisés avec les experts en sécurité civile ont montré que l'exposition de la population doit être évaluée à l'échelle du bâtiment. La présence d'un sous-sol et l'élévation du premier plancher ont été identifiés comme les caractéristiques des bâtiments pouvant être utilisées pour évaluer l'exposition de la population.

Au Québec, la plupart des caractéristiques des bâtiments résidentiels sont renseignés dans le rôle d'évaluation foncière. Le rôle d'évaluation foncière est un inventaire des bâtiments situés sur le territoire d'une municipalité, évalués sur une même base et à une même date. Cette évaluation, qui est obligatoire, est réalisée à des fins fiscales, puisqu'elle permet de déterminer le taux de taxation de chaque unité d'évaluation inscrite au rôle, d'évaluer la taxation foncière scolaire mais aussi de répartir les dépenses entre différents organismes (communautés métropolitaines, MRC, etc.) (ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du Territoire 2014). La mise à jour du rôle d'évaluation se fait tous les trois ans pour les municipalités de plus de 5 000 habitants et tous les 6 ans pour les municipalités de plus petite taille. Les informations sont réunies par un évaluateur agréé, et leur exactitude doit être vérifiée au moins tous les 9 ans.

Un certain nombre de renseignements relatifs aux immeubles doivent obligatoirement figurer au rôle d'évaluation foncière de toute municipalité située au Québec. Parmi ces renseignements obligatoires, on retrouve la plupart des informations utiles à l'évaluation de l'exposition de la population à l'inondation et à sa cartographie dans un SIG : adresse, cadastre et numéro de lot, caractéristiques du bâtiment, genre de construction et dimensions de base du sous-sol.

Ces données peuvent être disponibles sur demande auprès des municipalités. Elles sont généralement transmises sous forme tabulaire, en format .xml ou .xls. Comme nous avons choisi d'exploiter le format .xls, aucun prétraitement n'est requis pour exploiter ces données.

On doit cependant souligner qu'aucune information n'est donnée sur l'élévation du premier plancher des bâtiments, qui est indispensable pour déterminer si celui-ci est atteint ou non par l'eau au cours de l'inondation. Il ne semble de plus pas exister de norme régissant cet aspect lors de la construction des bâtiments résidentiels, et permettant de définir avec certitude cette valeur. Il a donc été nécessaire d'attribuer une valeur approximative à l'élévation du premier plancher pour les bâtiments résidentiels avec sous-sol et sans sous-sol, tels que ceux présentés dans la Figure 6.1. Ces valeurs approximatives ont été dérivées de repères proches de la ligne séparant souvent le sous-sol du premier plancher sur les bâtiments résidentiels, sur des images Google Street View (2016) de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu.



Maison de plain-pied avec sous-sol
(Rue Lord, Saint-Jean-sur-Richelieu)



Maison sans sous-sol, avec étages
(Rue Parenteau, Saint-Jean-sur-Richelieu)

Figure 6.1: Bâtiment résidentiel de plain-pied avec sous-sol et bâtiment à étage sans sous-sol, typiques de l'habitat résidentiel québécois (Google Street View, 2016)

L'élévation approximative du premier plancher pour les maisons de plain-pied avec sous-sol a été évaluée à 80 cm. Elle a été évaluée à 15 cm pour les maisons sans sous-sol. Ces deux valeurs ont été retenues comme les valeurs d'élévation du premier plancher pour ces deux types de bâtiments et ont été intégrées aux données du rôle d'évaluation foncière du bâtiment pour l'étude de cas qui sera présenté au Chapitre 7. Les bâtiments pour lesquels le champ « aire totale du sous-sol » est renseigné sont considérés comme des bâtiments ayant un sous-

sol, et dont le premier plancher est ainsi surélevé de 80 cm. Les bâtiments pour lesquels le champ « aire totale du sous-sol » est vide sont considérés comme des bâtiments sans sous-sol, avec un premier plancher surélevé de 15 cm.

On doit souligner que dans le cadre d'un projet conjoint à celui qui est ici présenté, des relevés ont été réalisés au cours de l'été 2016 dans une zone résidentielle de Saint-Jean-sur-Richelieu, afin d'estimer avec une plus grande précision les élévations du premier plancher des différents types de bâtiments. Les données générées n'étaient pas encore disponibles au moment de l'étude de cas, mais elles seront intégrées prochainement à la méthode d'évaluation de l'exposition de la population. Enfin, l'outil développé inclut la possibilité de modifier très aisément ces valeurs, afin de permettre à l'utilisateur de les adapter aux types de bâtiments présents dans la zone étudiée.

b) Emplacement et forme des bâtiments

Afin de pouvoir déterminer si un bâtiment présent dans la zone inondée est touché ou non par l'eau et dans le but de cartographier au sein d'un SIG le niveau d'exposition de la population présente dans chaque bâtiment, il est nécessaire d'avoir à disposition des données sur l'emplacement et sur la forme exacte de chaque bâtiment, quelle que soit sa fonction. Ces données devraient être disponibles sous forme de polygones géoréférencés (chaque bâtiment étant représenté par un polygone), en format de « fichier de forme » (shapefile) pour faciliter leur intégration dans un SIG. La Figure 6.2 présente un exemple de ce type de données. Au Québec, ces données sont généralement disponibles auprès des services d'urbanisme des municipalités ou encore auprès des Municipalités Régionales de Comté (MRC). Leur accessibilité est cependant contrôlée et se fait sur demande auprès des services concernés.

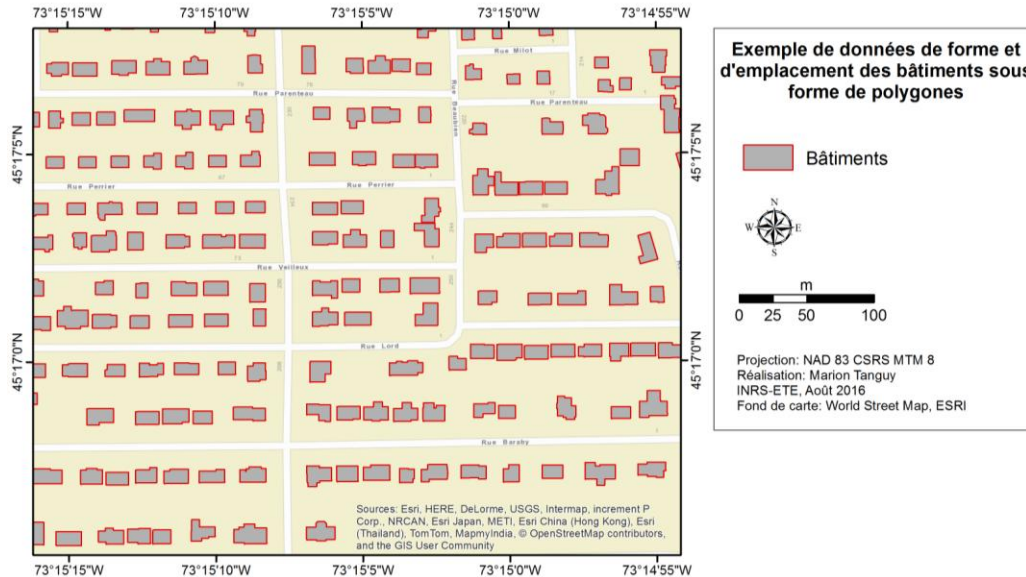


Figure 6.2: Exemple de données de forme et d'emplacement des bâtiments, sous forme de polygones

c) *Plan cadastral*

Les polygones des bâtiments renseignent sur l'emplacement des bâtiments et sur leur forme, mais ne donnent aucune information sur leurs autres caractéristiques physiques, telles que celles identifiées dans le rôle d'évaluation foncière. Il est possible que la table attributive des polygones des bâtiments transmis par les municipalités et les MRC indique déjà le numéro de lot cadastral¹ du terrain sur lequel le bâtiment a été construit. Il est alors possible de faire le lien entre le bâtiment et les informations contenues dans le rôle d'évaluation foncière, qui permettront d'évaluer l'exposition de la population à l'échelle du bâtiment.

Ce numéro de lot cadastral peut cependant ne pas être indiqué dans la table attributive des polygones des bâtiments, en particulier si ces polygones ont été générés manuellement. Il est alors nécessaire d'avoir à disposition le plan cadastral de la zone d'étude, indiquant les limites de chaque lot cadastral ainsi que son numéro. Ces données devraient être disponibles sous forme de polygones représentant la surface couverte par chaque lot cadastral, en format de fichier « shapefile ». Elles permettront d'attribuer à chaque polygone de bâtiment le numéro cadastral du lot sur lequel ce bâtiment repose, et ainsi de faire le lien avec les données du rôle

¹ Le numéro cadastral est un numéro officiel unique, enregistré au Registre foncier du Québec, qui permet d'identifier chaque propriété foncière et qui la lie à un plan. Ce plan indique la position de la propriété foncière, ses mesures, sa superficie et sa forme. Source : Énergie et Ressources Naturelles Québec. <http://mern.gouv.qc.ca/foncier/cadastre/>

d'évaluation foncière utiles à l'évaluation de l'exposition de la population. La Figure 6.3 présente un exemple de plan cadastral, indiquant les limites des propriétés foncières ainsi que leurs numéros de lot. Les polygones des bâtiments sont inclus dans la figure à titre informatif uniquement.

Le plan cadastral en format numérique de la zone d'étude peut être transmis par les services d'urbanisme des municipalités, mais aussi par le ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec, qui est en charge du Registre foncier du Québec. Une fois encore, quelle que soit la source de ces données, on devra s'assurer que leur système de projection géographique et leur système de référence spatiale soient identiques à ceux des autres données cartographiques utilisées dans le cadre du projet.

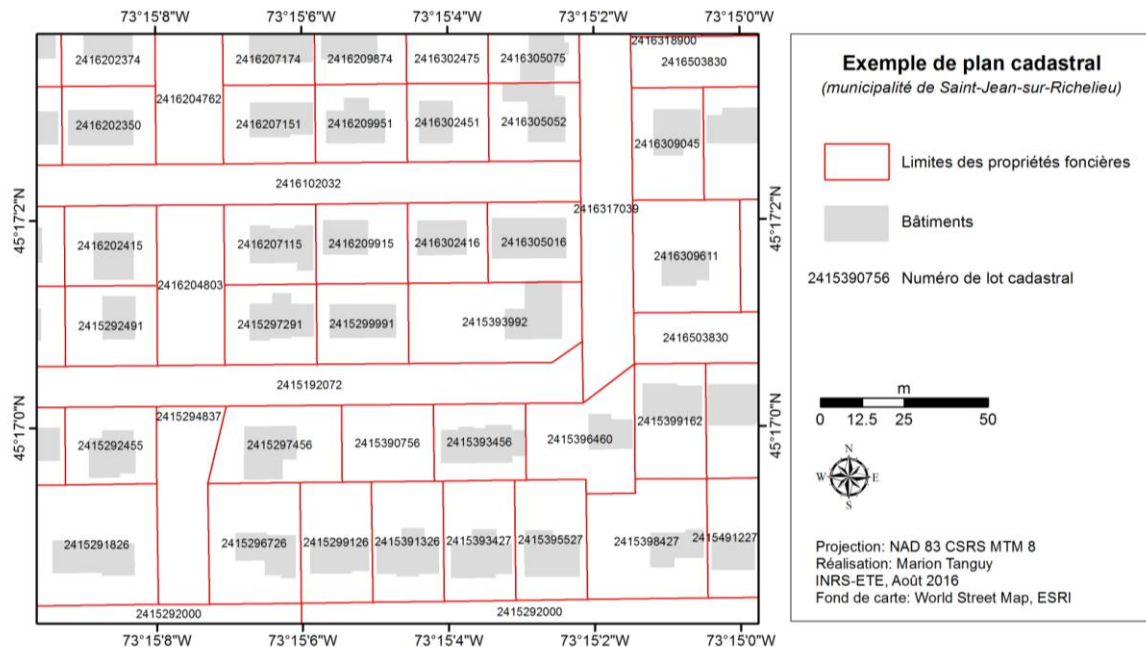


Figure 6.3: Exemple de plan cadastral, indiquant les limites des chaque propriété foncière ainsi que son numéro de lot cadastral

d) Données de hauteurs d'eau dans la zone inondée

Enfin, pour pouvoir déterminer quelles sont les parties du bâtiment qui sont inondées, il est nécessaire d'avoir à disposition des données de hauteur d'eau dans l'ensemble de la zone inondée.

Pour pouvoir être exploitées dans un SIG, ces données de hauteur d'eau doivent être disponibles en format matriciel (ou raster). La valeur de chaque cellule du fichier raster doit représenter la hauteur d'eau au niveau de la surface représentée par la cellule. La résolution spatiale du fichier raster doit être la plus fine possible, pour permettre une estimation précise de la hauteur d'eau au niveau de chaque bâtiment. Nous avons utilisé les hauteurs d'eau dérivées de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées basées sur l'imagerie RSO et sur des données à caractère hydraulique telles que décrites aux sections 3.2 et 4.4 de cette thèse. Ces hauteurs sont fournies en format matriciel, avec une résolution spatiale de 1 m.

6.2.3 Données disponibles pour l'évaluation de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

a) Emplacement et forme des infrastructures essentielles

Lors de la présentation des réponses obtenues aux questions portant sur l'évaluation de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles, il a été souligné que l'outil de cartographie dynamique du risque devrait indiquer l'emplacement des différentes infrastructures essentielles présentes dans la zone d'étude, ainsi que leur état (inondé/non inondé). Il est donc nécessaire de disposer de données indiquant l'emplacement, la forme ainsi que la fonction de chaque infrastructure essentielle. Ces informations doivent être disponibles sous la forme de polygones, inclus dans un fichier en format shapefile. Les services d'urbanisme des municipalités ou encore les MRC possèdent généralement ce type de données. Il est cependant rare qu'elles soient disponibles librement, et on y accède généralement sur demande auprès des services concernés.

Ces polygones sont généralement disponibles à l'échelle 1:20 000 dans la Base de Données Topographiques du Québec, créée par le ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec (ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec 2008). Elles sont disponibles dans le système de référence NAD83. Cependant, ces données étant extraites de

photographies aériennes à l'échelle 1:40 000, il est possible que la forme des polygones ne corresponde pas exactement à la forme réelle des bâtiments. De plus, la précision planimétrique de ces données est de 4 m et la fréquence de leur mise à jour n'est pas documentée.

b) Le cas des réseaux routiers, d'eau potable et électricité

L'isolement de la population dû à l'inondation de certains segments du réseau routier a été identifié par l'ensemble des experts comme un facteur important de la vulnérabilité. L'intégration de cet aspect à l'outil d'évaluation de la vulnérabilité peut se faire à l'aide de données numériques vectorielles du réseau routier. De telles données sont incluses dans le Réseau Routier National de la Base de Nationale de Données Topographiques (BNDT), dont l'accès gratuit en ligne est permis par Ressources Naturelles Canada (Ressources Naturelles Canada, 2016). Elles couvrent l'ensemble du Canada, par province, à l'échelle 1:20 000. Chaque route est découpée en segments, définis par des intersections de routes, et est représentée sous forme de vecteur. La classe de chaque segment de route (ex : rue, artère, rampe d'accès, autoroute, etc.), ainsi que son nom et éventuellement son numéro, sont indiqués dans la table attributaire des données vectorielles. Elles sont transmises dans le système de référence géodésique NAD 83, avec une projection cartographique MTM. Ces données ont été mises à jour en 2016 pour la province de Québec.

L'intégration des effets de la non fonctionnalité des réseaux d'eau potable et des réseaux d'électricité nécessiterait d'avoir à disposition des données numériques vectorielles permettant de lier les infrastructure produisant ces ressources aux bâtiments les utilisant. Au Québec, les informations sur le réseau électrique sont détenues par Hydro-Québec, le principal fournisseur d'électricité du Québec. Étant considérées comme « sensibles », ces informations ne sont pas divulguées au public. Certains ministères y ont cependant accès. Pour des raisons similaires, il n'a également pas été possible d'avoir accès aux réseaux d'eau potable des municipalités. Soulignons que l'électricité peut aussi être coupée par Hydro-Québec dans une zone inondée pour des raisons de sécurité, dans le but de prévenir le risque d'électrocution ou encore d'incendie. Dans ce second cas de figure, il n'apparaît pas indispensable de disposer de données sur le réseau électrique.

c) Données de hauteur d'eau dans la zone inondée

Afin de déterminer quelles sont les infrastructures touchées par l'inondation et qui sont ainsi considérées comme ne produisant plus de ressources essentielles pour la population, des données de hauteur d'eau (section 6.2.2) dans l'ensemble de la zone inondée sont nécessaires.

6.3 Méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours

Cette troisième sous-section présente les méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain au cours d'une inondation, qui découlent des réponses obtenues aux questionnaires portant sur les différentes composantes de la vulnérabilité et de la revue des données disponibles pour leur intégration dans un outil d'aide à la décision prenant la forme d'un SIG. Les trois composantes de la vulnérabilité retenues sont évaluées de manière individuelle, à l'aide d'approches spécifiques. L'agrégation de leurs résultats permet ensuite d'obtenir une évaluation du risque humain au cours de l'inondation. La Figure 6.4 présente l'organigramme méthodologique de l'approche développée.

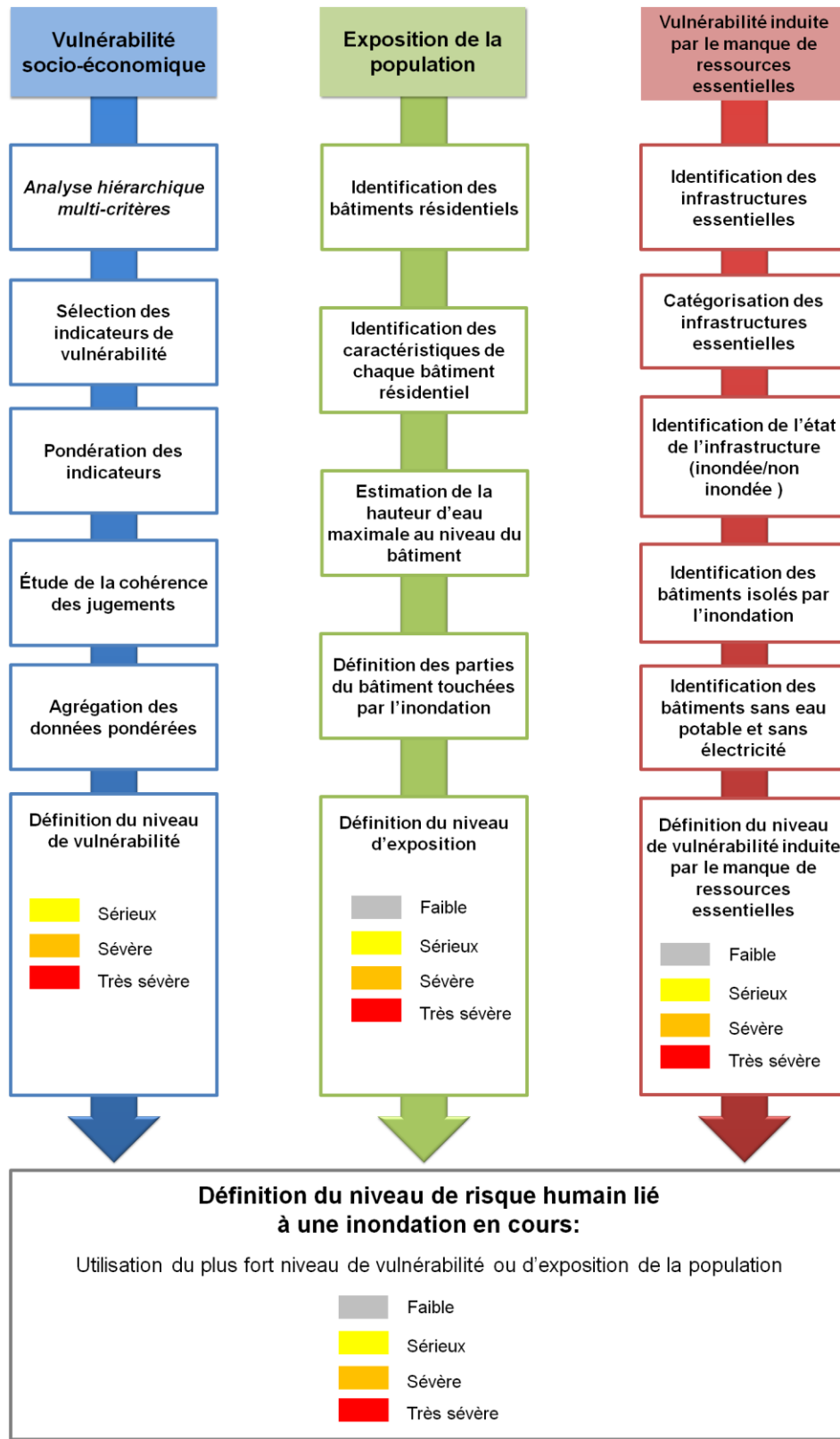


Figure 6.4: Organigramme des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours

Les méthodes développées pour l'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité et pour l'évaluation du risque sont des méthodes simples. Cela devrait permettre une interprétation facile du niveau de vulnérabilité puis du niveau de risque en termes de conséquences pour la population et ainsi de gestion de l'intervention.

6.3.1 Évaluation et cartographie de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation

L'approche choisie pour évaluer la vulnérabilité socio-économique est une approche d'évaluation multicritères. Les méthodes multicritères sont des outils d'évaluation et d'aide à la prise de décision fréquemment utilisés dans les problématiques intégrant plusieurs décideurs proposant souvent plusieurs critères d'évaluation et des scénarios d'évaluation alternatifs. Elles consistent à ordonner les solutions sur la base d'un critère unique ou de différents critères appréhendés dans leur pluralité, avec l'objectif de faire ressortir une ou des propositions s'approchant le plus des objectifs identifiés et ainsi d'aboutir à une décision commune (Cherqui, 2005). Ces méthodes inductives ont pour intérêt d'être aisément applicables aux études spatiales et d'être intégrables à un SIG (Meyer *et al.*, 2008). Elles ont ainsi été très fréquemment utilisées dans des études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire ou d'une activité aux aléas d'origine naturelle ou anthropique, et notamment au risque d'inondation (voir par exemple les travaux présentés par Barczak *et al.*, 2007; Renard *et al.*, 2010; Barroca *et al.* 2005; Meyer *et al.*, 2008; Scheuer *et al.*, 2011).

Les approches d'évaluation spatiales multicritères sont généralement constituées de 4 composantes : les critères d'entrée, leurs poids d'importance relative, une structure d'agrégation et une carte de pertinence finale (Jankowski, 1995). Les critères d'entrée sont des facteurs considérés par les experts inclus dans le processus décisionnel comme ayant une influence majeure sur le phénomène analysé, et pouvant être caractérisés par leurs attributs respectifs. Afin de réduire la variance entre les unités et les types de données utilisés pour caractériser ces attributs, celles-ci doivent être standardisées. Cette standardisation peut être appliquée à l'aide de diverses méthodes : linéaires, non linéaires, logique floue, raisonnement inductif ou déductif (Montgomery, 2015). La pondération de chacun des critères permet ensuite de refléter l'importance relative donnée à chaque critère par les experts. Les critères pondérés sont enfin agrégés, pour obtenir une carte de pertinence finale.

Dans le cadre de ces travaux, l'analyse spatiale multicritère n'est pas exploitée dans le but de sélectionner une solution optimale en fonction d'objectifs établis en élaborant un compromis

représentatif des divers avis exprimés. Les indicateurs à intégrer à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique ont déjà été identifiés à l'aide d'experts en sécurité civile, et leur importance relative sur la vulnérabilité a déjà été renseignée. La pondération de ces indicateurs ainsi que leur agrégation doivent encore être réalisées, afin d'obtenir une évaluation de la vulnérabilité socio-économique. Plusieurs méthodes d'analyses spatiales multicritères peuvent être mises à profit pour réaliser ces deux étapes. On pourra en trouver une revue dans les travaux présentés par Montgomery (2015), qui a appliqué puis comparé les résultats de différentes méthodes d'analyse spatiales multicritères pour l'évaluation de la pertinence de l'utilisation de certaines surfaces à des fins agricoles.

La méthode retenue est l'analyse multicritère hiérarchique (AMH) (ou *Analytic Hierarchy Process*), développée par Saaty (Saaty, 1980). Cette méthode permet de prioriser ou de donner une hiérarchie aux différentes composantes et sous-composantes d'un système ou d'un phénomène, en leur attribuant de manière individuelle un poids relatif à leur impact sur ce système ou sur ce phénomène. La dérivation de ces poids, ou « priorités relatives », est réalisée à l'aide d'une méthode de comparaisons par paires partageant un attribut commun, qui repose sur l'expérience et le jugement d'experts (Renard *et al.*, 2010; Saaty, 1994). Enfin, la valeur des données relatives à chaque composante ou sous-composante du système est multipliée par le poids attribué à chaque composante, puis l'ensemble des valeurs des différentes composantes du système sont additionnées, pour obtenir finalement une évaluation quantitative de la caractéristique du système qui est ciblée.

Cette approche tenant non seulement compte du fonctionnement de l'ensemble du système mais aussi des interrelations entre ses différentes composantes, c'est à la fois une approche systémique et une approche déductive (Renard *et al.*, 2010). L'AMH est appréciée pour sa relative simplicité mais également pour le modèle facilement compréhensible d'organisation des données qu'elle propose. Enfin, elle intègre une étape d'évaluation a posteriori de la cohérence des jugements, à l'aide d'un indice de cohérence. L'AMH a déjà été mise à profit dans plusieurs études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité des zones urbaines et des populations aux aléas naturels, incluant l'aléa inondation (on pourra consulter à titre d'exemple les travaux de Dewan, 2013; Rashed *et al.*, 2003; Sebald, 2010; Renard *et al.*, 2010; ou encore de Ouma *et al.*, 2014. Les cinq étapes de l'AMH menant à l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation, ainsi que la manière dont elle est intégrée à l'outil d'évaluation du risque, sont ici détaillées.

Étape 1 : Définition de l'importance relative des indicateurs

La première étape de cette approche consiste en l'évaluation de l'importance relative de chaque indicateur, selon son influence sur la vulnérabilité. On utilise pour cela une méthode de comparaison par paire, qui consiste à comparer à l'intérieur d'une matrice chaque indicateur de vulnérabilité avec un autre et à attribuer à chaque paire un coefficient de comparaison. Le premier indicateur de la première ligne de la matrice est comparé à chaque indicateur de chaque colonne de cette matrice. Cette opération est effectuée de manière successive pour chaque indicateur de chaque ligne. L'échelle utilisée pour attribuer un coefficient de comparaison à chaque paire d'indicateurs est celle proposée par Saaty (1980), puis modifiée par Griot (2003). Elle est présentée dans le Tableau 6.4.

Tableau 6.4: Échelle de comparaison binaire utilisée pour la comparaison par paire des indicateurs de vulnérabilité, d'après Saaty (1980) et Griot (2003)

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale	Définition
1	A la même importance	Contribution identique à l'évaluation de la vulnérabilité
3	Un indicateur est un peu plus important que l'autre	Un indicateur est légèrement favorisé par rapport à l'autre indicateur
5	Un indicateur est plus important que l'autre	Un indicateur est vraiment favorisé par rapport à l'autre indicateur
7	Un indicateur est beaucoup plus important que l'autre	Un indicateur est fortement favorisé par rapport à l'autre indicateur
9	Un élément est absolument plus important que l'autre	Un indicateur domine l'autre indicateur
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Utilisées pour affiner le jugement lorsqu'un compromis est nécessaire entre deux appréciations
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, etc	Valeurs réciproques des appréciations précédentes	

Enfin, afin d'illustrer cette technique, le Tableau 6.5 présente un exemple de comparaison par paires d'indicateurs de vulnérabilité sociale, utilisés dans les travaux de Sebald (2010).

Tableau 6.5: Exemple de comparaison par paire d'indicateurs de vulnérabilité sociale, à l'aide de l'échelle de comparaison binaire proposée Saaty (1980) et modifiée par Griot (2003)

Indicateurs de vulnérabilité	Genre (Femme)	Personnes sans emploi	Personnes âgées	Densité de population
Genre (Femme)	1	5	9	3
Personnes sans emploi	1/5	1	7	3
Personnes âgées	1/9	1/7	1	5
Densité de population	1/3	1/3	1/5	1

Étape 2 : Calcul du poids de chaque indicateur de vulnérabilité

L'étape suivante consiste en le calcul du poids de chaque indicateur de vulnérabilité, calculé à partir des résultats de la comparaison par paire. Les principales valeurs propres et le vecteur propre droit normalisé associés à la matrice de comparaison par paire permettent d'obtenir le poids des différents indicateurs comparés dans la matrice.

La valeur propre de chaque comparaison par paire est tout d'abord calculée, en divisant le degré d'importance numérique attribué à la paire par la somme des degrés d'importance numérique de la colonne. Les vecteurs propres droit normalisés sont ensuite estimés, en calculant tout d'abord la somme des valeurs propres contenues dans chaque ligne de matrice, puis en divisant cette valeur par le nombre d'indicateurs contenus dans la matrice. Le vecteur propre droit normalisé associé à chaque indicateur est le poids attribué à chaque indicateur.

Étape 3 : Étude de la cohérence des jugements

L'attribution des coefficients de comparaison étant faite de manière subjective, il est ensuite nécessaire de vérifier leur cohérence. La cohérence des réponses est estimée à l'aide d'un ratio issu de la valeur propre de la matrice de comparaison.

L'évaluation de la cohérence des jugements peut être faite à l'aide d'un Indice de Cohérence (IC), formulé de la manière suivante :

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (17)$$

Où : λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice, qui peut être obtenue en multipliant le total de chaque colonne de la matrice de comparaison par paires par le poids relatif à l'indicateur de cette colonne, et en additionnant les résultats obtenus pour chaque colonne

n est le nombre d'éléments comparés dans la matrice

On calcule ensuite un rapport de consistance (RC), tel que :

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (18)$$

Où : IA est un Indice de cohérence Aléatoire.

La valeur de l'IA a été donnée par Saaty (1977), et est fonction du nombre d'éléments comparés dans la matrice (Tableau 6.6).

Il est empiriquement admis que les poids attribués aux indicateurs sont cohérents si $RC \leq 0,10$. Si ce seuil d'incohérence est dépassé, la matrice de comparaison par paire n'est pas valide et doit être réexaminée.

Tableau 6.6: Valeur de l'Indice de Cohérence Aléatoire, selon le nombre d'éléments comparés dans la matrice (extrait de Saaty, 1977)

Nombre d'éléments dans la matrice														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Indice de cohérence aléatoire associé														
0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Étape 4 : Agrégation des données pondérées

L'avant-dernière étape de l'AMH telle qu'elle est exploitée dans notre modèle consiste en l'agrégation des données pondérées, dans le but d'obtenir une évaluation de la vulnérabilité socio-économique. La valeur de chaque indicateur de vulnérabilité est alors exprimée en pourcentage de la population par AD, qui est l'échelle à laquelle les données sont diffusées par Statistiques Canada. On utilise pour cela le nombre total de personnes recensées dans chaque AD.

On évalue tout d'abord dans quel quantile la valeur de chaque indicateur dans l'AD se trouve par rapport à l'ensemble des AD de la municipalité. Une valeur relative est attribuée à chaque indicateur en fonction du quantile dans lequel elle se trouve. Ces valeurs relatives sont présentées dans le Tableau 6.7.

Tableau 6.7: Valeur relative attribuée à chaque indicateur de vulnérabilité dans une AD, selon la position de sa valeur par rapport à la valeur de l'indicateur dans l'ensemble des AD

	Valeur relative V				
	0	1	2	3	4
Position de la valeur de l'indicateur *	Inférieur à la valeur médiane	Entre la médiane et le quantile 75%	Entre 75% et 95 %	Entre 95% et 99%	Supérieur à 99%

(*) Par rapport aux valeurs de l'indicateur dans l'ensemble des AD

L'estimation de la vulnérabilité socio-économique dans l'AD se fait en multipliant le poids P attribué à chaque indicateur à sa valeur relative V dans l'AD, puis en additionnant l'ensemble des valeurs obtenues pour chaque indicateur.

La fonction de vulnérabilité socio-économique peut ainsi s'exprimer de la manière suivante :

$$Vul_{socio-éco} = P_1 * V_1 + P_2 * V_2 + P_3 * V_3 + P_n * V_n \quad (19)$$

Où : $Vul_{socio-éco}$ est la vulnérabilité socio-économique

P_1 est le poids attribué à l'indicateur

V_1 est la valeur relative attribuée à l'indicateur dans l'AD

Étape 5 : Définition des niveaux de vulnérabilité

La valeur de la vulnérabilité socio-économique obtenue à l'issue de l'agrégation des données pondérées est une valeur quantitative, ayant peu de sens en termes de gestion de crise si elle est prise telle qu'elle, et pouvant difficilement être cartographiée. Nous avons donc choisi d'exprimer les valeurs de la vulnérabilité socio-économique selon une échelle de vulnérabilité, présentée au Tableau 6.8. Le code couleur utilisé pour cartographier chaque niveau de vulnérabilité à l'aléa inondation y est également indiqué. Le niveau de vulnérabilité estimé pour chaque AD sera attribué à chaque bâtiment résidentiel présent dans l'AD. Une terminologie identique (Sérieux, Sévère, Très Sévère) est utilisée pour définir les niveaux de vulnérabilité de l'ensemble des composantes de la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation et pour les cartographier, et cela dans le but de faciliter le processus d'évaluation finale du risque. De plus, le niveau de vulnérabilité « Faible » n'est pas intégré à cette échelle. Il est en effet considéré que tout individu est d'une manière ou d'une autre sensible à l'aléa inondation, et que sa présence dans une zone exposée à l'aléa doit être prise en compte.

Tableau 6.8: Niveaux de vulnérabilité socio-économique, selon la valeur de la vulnérabilité obtenue par la méthode de l'AMH

Niveaux de vulnérabilité socio-économique				
		Sérieux	Sévère	Très Sévère
Valeurs de la vulnérabilité socio-économique (éq. 19)		Entre 0 et 1	Entre 1 et 2	Plus de 2

6.3.2 Évaluation et cartographie de l'exposition de la population au cours de l'inondation

Les niveaux d'exposition de la population à l'inondation ont été définis en tenant compte de la manière dont la population et les experts en sécurité civile perçoivent l'exposition à l'aléa : le niveau d'exposition de la population doit être considéré comme élevé dès que le bâtiment est inondé, mais doit aussi permettre de différencier les bâtiments dont seul le sous-sol est inondé des bâtiments dont le premier plancher est inondé. Trois niveaux d'exposition ont été ainsi définis, comme présenté dans le Tableau 6.9.

La méthode développée pour définir l'exposition de la population à l'aléa inondation tient d'abord compte des caractéristiques de chaque bâtiment (étape 1), puis de la hauteur d'eau au niveau des bâtiments, ce qui va permettre de déterminer les parties du bâtiment qui sont touchées par l'inondation (étape 2). Les deux étapes sont détaillées dans les prochains paragraphes et un organigramme méthodologique est présenté à la Figure 6.5.

Tableau 6.9: Niveaux d'exposition de la population à l'aléa inondation

Niveau d'exposition	Description
Faible	Le bâtiment n'est pas inondé
Sévère	Le sous-sol du bâtiment est inondé
Très Sévère	Le premier plancher du bâtiment est inondé

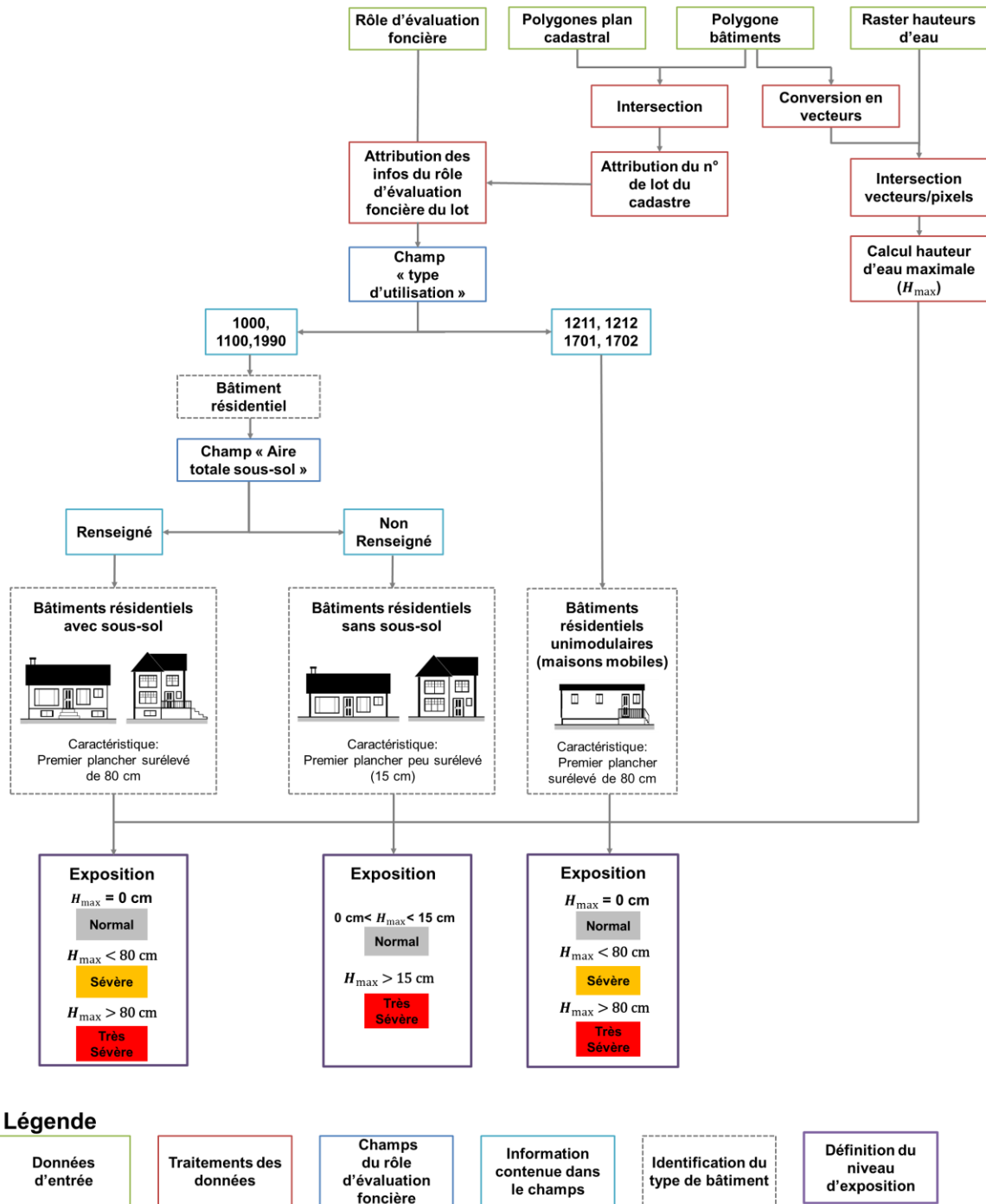
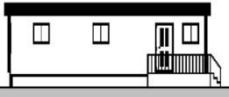




Figure 6.5: Organigramme de la méthode d'évaluation de l'exposition de la population à l'aléa inondation

Étape 1 : Identification des caractéristiques des bâtiments

La première étape de la méthode consiste en l'identification des caractéristiques de chaque bâtiment présent dans la zone étudiée. Une typologie du bâti a été définie, en tenant compte des caractéristiques principales des bâtiments résidentiels au Québec. Cette typologie est présentée dans le Tableau 6.10.

Tableau 6.10: Typologie du bâti résidentiel au Québec

Type de bâtiments	Caractéristiques générales	Graphique (*)
Bâtiments unimodulaires	Premier plancher surélevé de 80 cm	
Bâtiments avec sous-sol <i>(de plain-pied ou avec étages)</i>	Premier plancher surélevé de 80 cm	
Bâtiments sans sous-sol <i>(de plain-pied ou avec étages)</i>	Premier plancher peu surélevé (15 cm)	

(*) Les graphiques ont été extraits et adaptés du document « Le rôle d'évaluation foncière et son contenu », présenté par le ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du Territoire (2014)

Les bâtiments unimodulaires sont des maisons d'un seul niveau fabriquées en usine, qui sont conçues et construites pour être transportées en une seule pièce à l'endroit où elles seront installées. Elles reposent sur des supports de bois, de métal ou de béton, et sont surélevées. Il s'agit ainsi souvent de maisons mobiles ou de roulottes.

L'identification des caractéristiques des bâtiments utilise en entrée les fichiers de formes (polygones) du plan cadastral de la zone et des bâtiments, ayant une projection cartographique identique, ainsi que les informations contenues dans le rôle d'évaluation foncière.

Chaque polygone représentant un bâtiment est tout d'abord lié au lot du plan cadastral, représenté par un polygone, sur lequel il repose. Le numéro de lot cadastral lui est ainsi attribué. Ce numéro de lot cadastral, qui est également indiqué dans le rôle d'évaluation foncière, permet d'attribuer au polygone l'ensemble des informations contenues dans le rôle d'évaluation foncière de ce lot. Les caractéristiques du bâtiment sont ensuite identifiées de la manière suivante :

- Le champ « *Type d'utilisation* » du rôle d'évaluation foncière de la ville est tout d'abord consulté. Les bâtiments dont le type d'utilisation est codé 1211 ou 1212 (maisons mobiles et roulottes résidentielles) ou encore 1701 ou 1702 (parcs de roulottes et de maisons mobiles) sont identifiés comme étant des bâtiments résidentiels unimodulaires.
- Les bâtiments dont le type d'utilisation est codée 1000 (logement), 1100 (chalet ou maison de villégiature) ou encore 1990 (autres immeubles résidentiels), sont identifiés comme étant des bâtiments résidentiels.
- Pour définir les caractéristiques de ces bâtiments résidentiels, le champ « *Aire du sous-sol* » est consulté. Si ce champ est vide pour un bâtiment, on considère que celui-ci n'a pas de sous-sol. Son premier plancher sera donc peu surélevé (15 cm). Si l'aire du sous-sol est indiquée, on considère que le bâtiment possède un sous-sol, et ainsi que le premier plancher est surélevé de 80 cm.

L'ensemble des caractéristiques du bâtiment est intégré à la table attributaire du polygone représentant le bâtiment.

Étape 2 : Définition de la partie des bâtiments atteinte par l'eau

La seconde étape de cette méthode consiste en la définition de la partie de chaque bâtiment qui est atteinte par l'eau. On utilise pour cela les fichiers de formes (polygones) des bâtiments, dont les caractéristiques sont renseignées dans la table attributaire, et les données de hauteur d'eau dans la zone inondée, en format matriciel (ou raster).

La méthode suivie est simple. On estime tout d'abord la hauteur d'eau au niveau de chaque bâtiment. Pour cela, les polygones des bâtiments sont convertis en un ensemble de lignes (ou vecteurs), représentant les contours des bâtiments. Les valeurs des pixels du raster des hauteurs d'eau qui sont intersectés par les vecteurs représentant ces contours sont ensuite extraites, pour chaque bâtiment. La valeur maximale de l'ensemble de ces pixels est retenue comme étant la hauteur d'eau au niveau de chaque bâtiment.

Utiliser la valeur maximale de ces pixels permet de ne pas minimiser la hauteur d'eau au niveau du bâtiment, et ainsi de considérer le scénario d'exposition le plus extrême. Il n'a de plus pas été jugé pertinent d'exploiter les valeurs des pixels de hauteur d'eau présents à l'intérieur des contours des bâtiments, comme cela peut être parfois le cas, puisque la méthode utilisée pour estimer les hauteurs d'eau ne permet en aucun cas de tenir compte de la manière dont l'eau peut s'infiltrer dans le bâtiment.

La hauteur d'eau maximale mesurée au niveau de chaque bâtiment est mise en relation avec les caractéristiques du bâtiment, afin de définir le niveau d'exposition de la population qui y réside. Les Tableau 6.11 à Tableau 6.13 présentent de manière synthétique les niveaux d'exposition définis en fonction de la hauteur d'eau au niveau du bâtiment et de la partie du bâtiment qui est ainsi touchée, et cela par type de bâtiment.

Tableau 6.11: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments avec sous-sol



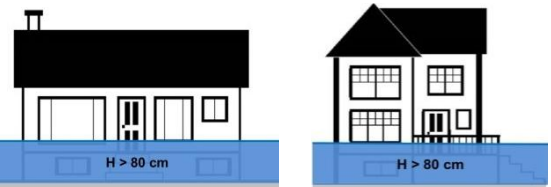
Bâtiments avec sous-sol			
Hauteur d'eau au niveau du bâtiment	Partie du bâtiment touchée	Graphique descriptif	Niveau d'exposition
Absence d'eau	Bâtiment non inondé		Faible
Moins de 80 cm	Sous-sol inondé		Sévère
Plus de 80 cm	Premier plancher inondé		Très Sévère

Tableau 6.12: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments sans sous-sol


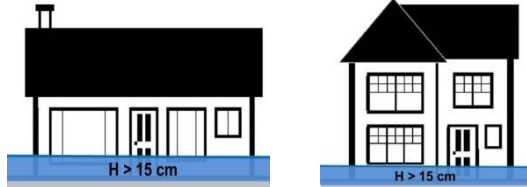
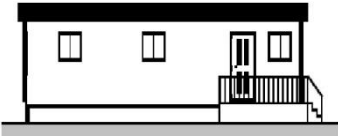
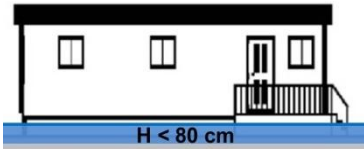
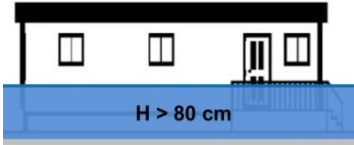
Bâtiments sans sous-sol			
Hauteur d'eau au niveau du bâtiment	Partie du bâtiment touchée	Graphique descriptif	Niveau d'exposition
Absence d'eau ou moins de 15 cm	Absence d'eau		Faible
Plus de 15 cm	Premier plancher inondé		Très Sévère

Tableau 6.13: Définition des niveaux d'exposition pour les bâtiments unimodulaires

Bâtiments unimodulaires			
Hauteur d'eau au niveau du bâtiment	Partie du bâtiment touchée	Graphique descriptif	Niveau d'exposition
Absence d'eau	Absence d'eau		Faible
Moins de 80 cm	Base inondée		Sévère
Plus de 80 cm	Premier plancher inondé		Très sévère

Enfin, tous les polygones des bâtiments résidentiels considérés comme inondés à l'issue de cette étape d'évaluation de l'exposition de la population sont identifiés. Le centroïde de chaque polygone est extrait à l'aide de l'outil « entités vers points » d'ArcGis 10.3. Tous les centroïdes des bâtiments inondés sont regroupés dans un nouveau fichier de forme, qui sera exploité par la suite dans la méthode d'évaluation de la vulnérabilité induite par le manque de certaines ressources essentielles.

6.3.3 Évaluation et cartographie de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

La dernière composante de la vulnérabilité intégrée à cet outil est la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles, en lien avec l'inondation des infrastructures produisant ces ressources. Seule l'inondation du réseau routier, qui induit l'isolement de la population au cours de l'inondation, et éventuellement le manque d'électricité et d'eau potable devraient être pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité. Si l'impact de l'inondation des infrastructures produisant les autres ressources n'est pas intégré à cette évaluation, il reste toutefois important

de préciser l'état (inondé/non inondé) de ces infrastructures dans la cartographie finale du risque.

a) *Vulnérabilité de la population induite par l'inondation du réseau routier*

Comme déjà souligné, l'inondation du réseau routier se traduit par l'isolement des individus résidant dans les bâtiments desservis par ce réseau. Cet isolement est considéré avec sérieux par les personnes en charge de la sécurité civile, qui conseillent fortement aux personnes isolées par l'inondation d'évacuer leur logement. Cet isolement a cependant des impacts moindres pour la santé et la sécurité des individus que l'inondation des bâtiments résidentiels, et a des implications différentes en termes de secours et d'assistance à la population. Il a ainsi été décidé de représenter cet isolement par un niveau de vulnérabilité « sérieux », tel que présenté dans le Tableau 6.14. Un bâtiment non inondé et non isolé conserve quant à lui un niveau de vulnérabilité « Faible ».

Tableau 6.14: Niveau de vulnérabilité de la population induite par l'inondation du réseau routier

Niveau de vulnérabilité	Description
Faible	Le bâtiment n'est pas inondé et n'est pas isolé
Sérieux	Le bâtiment n'est pas inondé, mais est isolé, la route permettant d'y accéder étant inondée

L'identification des bâtiments isolés par l'inondation mais non inondés exploite certaines des fonctions de l'outil « Analyse de réseau » (*Network Analyst*) du logiciel ArcGis 10.3. Cet outil permet de créer un jeu de données réseau (comme un réseau routier, un réseau électrique, etc.) et de réaliser des analyses sur ce jeu de données, en y définissant au besoin des règles de connectivité ou encore des attributs de réseau (telles que des barrières, des règles de circulation, etc.). Cet outil a permis de générer des itinéraires entre un point de départ, qui pourrait par exemple représenter une caserne de pompiers, situé sur ou à proximité d'une section non inondée du réseau routier, et l'ensemble des bâtiments résidentiels présents dans la

zone d'étude. La définition de contraintes de circulation sur ce réseau, à savoir de barrières matérialisées par des segments de routes inondés, permet d'identifier les bâtiments pour lesquels aucun itinéraire ne peut être généré à cause de l'inondation. Ces bâtiments sont ainsi considérés comme isolés. La Figure 6.6 schématise la génération d'itinéraires entre un point de départ matérialisant une caserne de pompier située en zone sèche, et deux bâtiments, l'un non inondé et non isolé et l'autre non inondé mais isolé.

L'identification des bâtiments non inondés mais isolés par l'inondation se fait en trois étapes. Il est important de souligner que la première étape de cette méthode est une étape de préparation des données nécessaire à la génération d'itinéraires avec l'outil « Network Analyst », et nécessitant à plusieurs reprises une intervention de l'utilisateur.

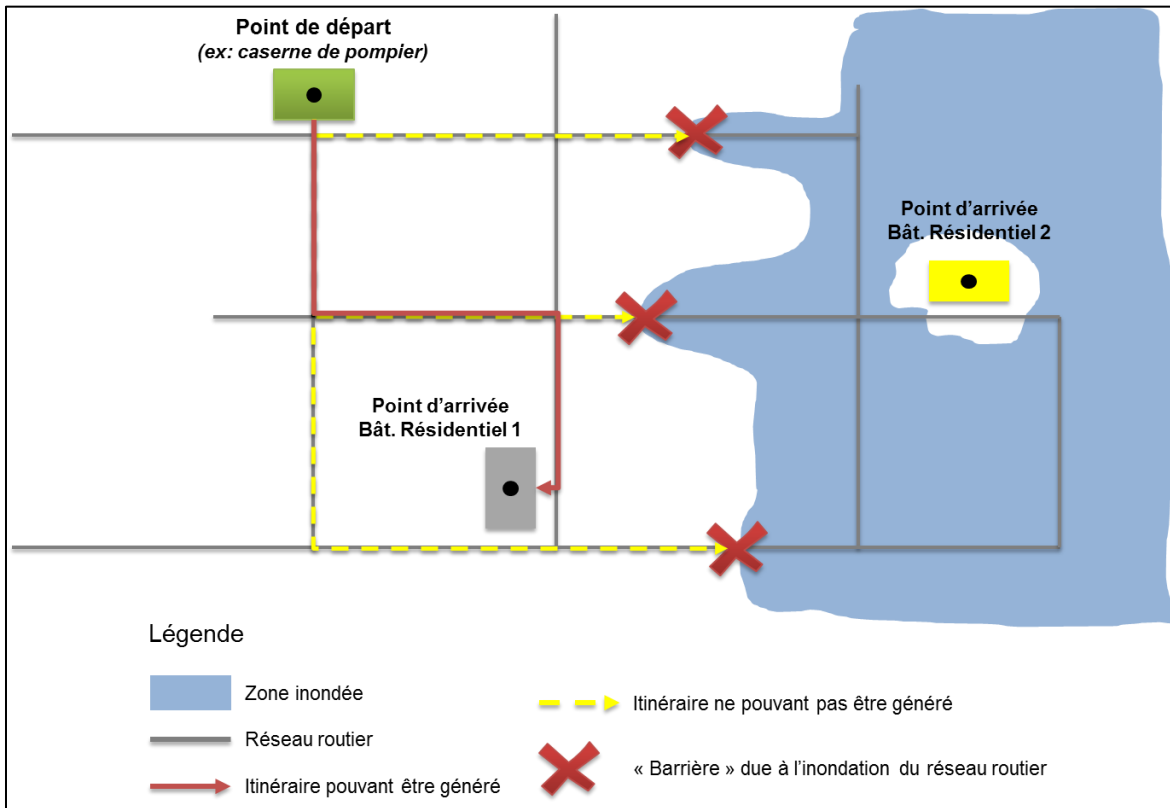


Figure 6.6: Schématisation de la génération d'itinéraires permettant d'identifier les bâtiments non inondés mais isolés

Étape 1 : Préparation des données - Création d'un jeu de données réseau

Pour pouvoir exploiter les capacités d'analyse de cet outil, il est tout d'abord nécessaire de créer un « jeu de données réseau » à partir du shapefile des routes de la zone d'étude. Cette première étape permet de créer un réseau routier à partir des segments de route contenus dans le shapefile des routes, en définissant leur connectivité. Cette étape est indispensable pour que l'outil « Network Analyst » puisse définir les chemins ou itinéraires réalisables le long du réseau routier. Aucune règle ni contrainte de circulation, comme la présence de sens uniques, de restrictions de tournants, etc., n'a été définie. En effet, nous avons considéré qu'en situation d'intervention, de telles contraintes de circulation ne sont pas respectées par les services de secours.

Il est ensuite nécessaire de définir des points matérialisant le point de départ et les points d'arrivée des itinéraires qui seront générés. Le point de départ est défini de manière manuelle par l'utilisateur sur une section du réseau routier qui n'est pas touchée par l'inondation. Les points d'arrivée sont les centroïdes des polygones représentant les bâtiments résidentiels, qui auront été préalablement générés à l'aide de la fonction « entités vers points » d'ArcGis 10.3.

Enfin, les segments du réseau routier qui sont atteints par l'inondation et qui ne pourront ainsi pas être empruntés par les services de secours ou par la population sont définis. Pour cela, les données raster de hauteur d'eau sont superposées aux données de réseau routier. Les segments du réseau routier intersectés par le raster des hauteurs d'eau sont extraits, puis sont utilisés en tant que restrictions linéaires ou barrières sur le réseau routier. Aucun itinéraire ne pourra ainsi passer par ces segments de route.

Étape 2 : Génération des itinéraires

Les itinéraires sont ensuite générés. On obtient un ensemble de lignes droites représentant les itinéraires ayant pu être générés entre le point de départ renseigné et les points d'arrivée, à savoir les centroïdes des bâtiments. Les bâtiments pour lesquels aucun itinéraire n'a pu être généré à cause des restrictions de circulation dues à l'inondation ne sont pas liés au point de départ par une ligne droite, et sont ainsi des bâtiments isolés (Figure 6.7).

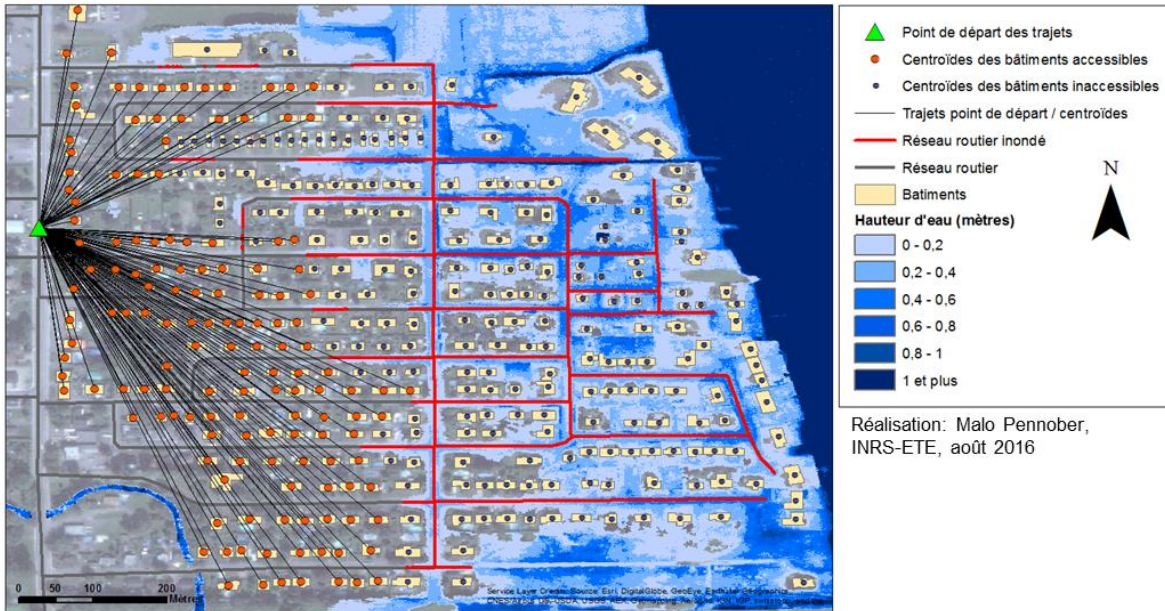


Figure 6.7: Fichiers obtenus à la suite de la génération d'itinéraires de l'outil Network Analyst, indiquant l'ensemble des couples « point de départ – centroïde du bâtiment résidentiel » pour lesquels un itinéraire a pu être généré. Les bâtiments résidentiels accessibles par la route sont matérialisés par des points orange, alors que les bâtiments non accessibles sont matérialisés par des points noirs

Étape 3 : Sélection des bâtiments isolés mais non inondés

La dernière étape consiste en l'identification des bâtiments isolés mais non inondés. Les centroïdes des bâtiments résidentiels inondés, générés à l'issue de l'application de la méthode d'évaluation de l'exposition de la population, ainsi que les centroïdes des bâtiments non isolés pour lesquels la génération d'un itinéraire est possible, sont soustraits au fichier de forme contenant les centroïdes de l'ensemble des bâtiments résidentiels. Les bâtiments isolés mais non inondés sont ainsi identifiés.

b) Identification des infrastructures essentielles inondées


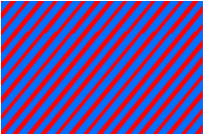




La cartographie des infrastructures essentielles inondées nécessite tout d'abord l'identification des infrastructures présentes dans la zone d'étude. Pour cela, une méthode similaire à celle utilisée pour identifier les bâtiments résidentiels est exploitée (voir section 6.3.1). Chaque polygone représentant un bâtiment ou une infrastructure essentielle est lié au polygone de lot cadastral, issu du plan du cadastre, sur lequel il repose. Le numéro de cadastre de ce lot lui est

ainsi attaché. Les informations relatives à ce lot qui sont inscrites dans le rôle d'évaluation foncière de la municipalité lui sont enfin attribuées. Le type de chaque infrastructure essentielle est ensuite identifié à l'aide du code défini dans le champ « Type d'utilisation », contenu dans les informations extraites du rôle d'évaluation foncière.

Les infrastructures essentielles ont été divisées en trois catégories (infrastructures de gestion de crise, infrastructures fournissant des services de base à la population et autres infrastructures essentielles), qui ont été validées par les experts en sécurité civile interrogés (section 6.1.3). Dans la cartographie finale, chaque catégorie d'infrastructure essentielle sera identifiée à l'aide d'une couleur spécifique à sa catégorie, alors que sa table attributaire précisera son type (ex : hôtel de ville, poste de police, etc.). Le Tableau 6.15 présente les codes couleur utilisés pour représenter chaque catégorie d'infrastructures essentielles.

L'état (inondé/non inondé) de chaque infrastructure est ensuite défini. Les polygones représentant les infrastructures essentielles sont convertis en un ensemble de lignes, matérialisant leurs contours. Si une de ces lignes croise ou recoupe un ou plusieurs des pixels du raster des hauteurs d'eau, alors le bâtiment est considéré comme inondé. Rappelons qu'aucun seuil de hauteur d'eau n'a été utilisé pour définir l'état de l'infrastructure essentielle, puisqu'il semble largement considéré, selon les experts interrogés, qu'une infrastructure est considérée comme non fonctionnelle dès qu'elle est atteinte par l'eau. Les codes couleur utilisés dans la cartographie finale du risque pour indiquer l'état des différentes catégories d'infrastructures essentielles sont présentés dans le Tableau 6.15.

Tableau 6.15: Codes couleur utilisés pour cartographier les différentes catégories d'infrastructures essentielles

Codes couleur		Catégorie d'infrastructure
Non inondé	Inondé	
		Infrastructures de gestion de l'intervention
		Infrastructures fournissant des services de base à la population
		Autres infrastructures essentielles

6.3.4 Évaluation et cartographie du risque humain lié à une inondation en cours

L'ultime étape de cette méthode consiste en l'évaluation et en la cartographie du risque humain lié à une inondation en cours. Parmi les nombreuses méthodes utilisées pour évaluer le risque, une des plus fréquemment mise à profit consiste en le calcul du produit de l'aléa et de la vulnérabilité. Les valeurs numériques obtenues sont ensuite classifiées en différentes catégories, qui auront été définies de manière statistique ou à l'aide d'intervalles précisés par l'utilisateur, puis sont cartographiées. Des exemples d'utilisation de cette approche d'évaluation du risque peuvent être trouvés dans les travaux de Chakraborty *et al.* (2005), de Müller (2013) ou encore de Kubal *et al.* (2009). Certains auteurs, tels que Montz *et al.* (2001), suggèrent également d'attribuer des poids aux différentes composantes du risque, avec pour argument que certaines variables contribuent davantage à la vulnérabilité de la population, et ainsi au risque, que d'autres.

Une des limites de ce genre d'approches est que même s'il est traduit en classes, le risque reste traité comme une valeur numérique. Cette valeur, ou la classe de niveau de risque intégrant

cette valeur, permettent avant tout d'analyser les tendances spatiales du risque, et ainsi de différencier les populations ou les zones les plus à risque de celles qui le sont moins. Le sens et les implications de ces valeurs en termes de gestion du risque et de gestion de l'intervention restent cependant peu évidents.

Deux des trois composantes de la vulnérabilité intégrées à cette étude, à savoir l'exposition de la population à l'inondation en cours ainsi que la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles, sont évaluées à l'aide d'approches qualitatives et sont directement traduites en niveaux de vulnérabilité ou d'exposition. Seule la vulnérabilité socio-économique est évaluée par l'intermédiaire d'une approche quantitative, puis est classifiée à l'aide d'une échelle commune à toutes les composantes de la vulnérabilité (Faible, Sérieux, Sévère et Très Sévère). On propose ainsi de définir comme niveau de risque le plus fort niveau de vulnérabilité de l'ensemble des trois composantes de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation évaluées à l'échelle du bâtiment, en considérant ainsi une contribution relative égale de ces différentes composantes. Utiliser le plus fort niveau de vulnérabilité permet de tenir compte du scénario le plus extrême lors de l'organisation de la gestion de l'intervention, et ainsi de ne pas minimiser les impacts de l'inondation sur la population qui y est exposée. Le risque n'est évalué que pour les bâtiments directement exposés à l'inondation (niveaux Sévère et Très Sévères) et isolés par l'inondation (niveau Sérieux), afin de ne mettre l'accent sur les zones atteintes par l'inondation et à l'intérieur desquelles se trouvent des individus pouvant avoir besoin d'assistance.

A titre d'exemple, si le niveau d'exposition des résidents d'un bâtiment est considéré comme sévère (sous-sol inondé), que le niveau de vulnérabilité socio-économique des résidents est sérieux (dans le cas par exemple de personnes propriétaires du logement, ayant déjà fait l'expérience d'inondations dans la zone) et que la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles est sévère (manque d'électricité depuis moins de 72 h en été), alors le niveau de risque humain est considéré comme Sévère.

A l'inverse, si le niveau d'exposition est Faible (bâtiment non inondé), que le niveau de vulnérabilité socio-économique des résidents est Très Sévère, comme cela pourrait être le cas avec des résidents âgés n'ayant jamais fait l'expérience d'inondations dans la zone, et enfin que la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles est sérieux (bâtiment isolé), le niveau de risque humain est considéré comme Très Sévère. Les résidents d'un bâtiment non inondé mais isolé ont un plus fort besoin d'assistance que les résidents d'un bâtiment ayant un sous-sol inondé et manquant d'électricité, car leurs caractéristiques socio-économiques les rendent en théorie moins bien préparés à l'aléa mais aussi plus sensibles à ses effets.

6.4 Sommaire

Ce sixième chapitre s'est concentré sur le développement de méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours. Le développement de ces méthodes a été guidé par les remarques issues de la revue de littérature présentée au Chapitre 5, mais aussi par l'expertise de responsables de la sécurité civile exerçant au niveau municipal ou gouvernemental. Cette expertise a porté en particulier sur les caractéristiques socio-économiques de la population influençant sa vulnérabilité, sur la manière dont l'exposition de la population est considérée au cours de l'inondation, sur la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles et enfin sur l'effet des mécanismes d'alerte sur l'évacuation de la population. Des questionnaires, regroupant l'ensemble des points de discussion à aborder avec les experts en sécurité civile, ont ainsi été développés.

Trois composantes ont finalement été retenues pour évaluer la vulnérabilité de la population à l'aléa inondation. Il s'agit de la vulnérabilité socio-économique, de l'exposition de la population à l'aléa en cours et enfin de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles. Chacune de ces composantes est évaluée à l'aide d'une méthode spécifique, intégrant des indicateurs sélectionnés suivant les commentaires des experts en sécurité civile et tenant compte de la disponibilité à grande échelle des données nécessaires à l'intégration de ces indicateurs. Les résultats de ces composantes de la vulnérabilité sont exprimés à l'aide d'une échelle de vulnérabilité commune comprenant 4 niveaux (Faible, Sérieux, Sévère et Très Sévère) et sont cartographiés à l'échelle du bâtiment. Le niveau de risque humain lié à l'inondation en cours est enfin défini comme le plus fort niveau de l'ensemble des trois composantes des vulnérabilités intégrées à la méthode, et est lui aussi cartographié à l'échelle du bâtiment.

Le chapitre suivant présentera une application de ces approches d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours à l'aide d'un scénario d'inondation réel.

7. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION ET DE LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE HUMAIN LIÉS À UNE INONDATION EN COURS

Ce septième chapitre illustre la pertinence des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours, à l'aide d'un scénario d'inondation survenu dans la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, en 2011. La première section présentera tout d'abord les données disponibles pour exploiter ces méthodes dans cette municipalité (7.1.1), puis décrira brièvement la zone sur laquelle elles ont été appliquées (7.1.2). La seconde section du chapitre se concentrera sur l'analyse des résultats obtenus. Ceux-ci seront tout d'abord présentés pour chaque composante de la vulnérabilité, à savoir la vulnérabilité socio-économique (7.2.1), l'exposition de la population (7.2.2) et enfin la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles (7.2.3). La quatrième sous-section s'intéressera enfin aux résultats de l'évaluation et de la cartographie du risque humain (7.2.4). La dernière section discutera du potentiel d'utilisation opérationnelle lors d'une phase d'intervention de ces méthodes et de l'outil d'aide à la décision qui en est dérivé (7.3.1). Nous insisterons ensuite sur les aspects de cet outil pouvant gêner son utilisation en phase d'intervention (7.3.2) et sur les améliorations qui pourraient potentiellement lui être apportées (7.3.3). Un sommaire rappellera les leçons apprises lors de l'application de l'outil à un scénario d'inondation réel (7.4).

7.1 Présentation des données disponibles et de la zone test

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours ont été appliquées à la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, qui a été sévèrement touchée par l'inondation de la rivière Richelieu, du mois d'avril à la fin du mois de juin 2011. Les caractéristiques de cet événement de grande ampleur ont été décrites dans la section 3.3.2. Cette municipalité a été choisie pour tester les méthodes développées car on dispose de données de hauteur d'eau dans les zones inondées pour l'ensemble de son territoire, pour la date du 1^{er} mai 2011 (voir section 4.4).

7.1.1 Données disponibles

La majorité des données nécessaires à l'application des méthodes développées sur la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu ont pu être obtenues. Le Tableau 7.1 résume les informations sur la disponibilité de ces données et sur leurs caractéristiques principales (type de données, date, source, échelle et format dans lequel les données ont été transmises).

Il n'a pas été possible d'obtenir les polygones géoréférencés représentant la forme des bâtiments présents dans la municipalité, qu'il s'agisse de bâtiments résidentiels ou d'infrastructures essentielles. Il a donc été nécessaire de créer ces données. Chaque bâtiment a ainsi été délimité manuellement à partir d'une orthophotographie d'une résolution de 0,1 m, acquise le 30 avril 2011, soit au cours de l'inondation. La présence d'eau dans les zones résidentielles n'a pas empêché la délimitation précise des bâtiments, la très haute résolution spatiale de l'image offrant une vue détaillée des éléments au sol. Cependant, la délimitation manuelle des bâtiments est un processus long. Il a ainsi été choisi de ne délimiter les bâtiments que dans une zone restreinte, qui sera présentée dans la section suivante.

Chaque polygone de bâtiment a par la suite été lié au lot cadastral sur lequel il repose et le numéro de ce lot cadastral lui a été attribué. Ce numéro de lot cadastral, qui est renseigné dans le rôle d'évaluation foncière de la ville, a permis d'attribuer au polygone l'ensemble des données d'intérêt de son rôle d'évaluation. On a ainsi pu distinguer les bâtiments résidentiels des infrastructures essentielles, et déterminer les caractéristiques des bâtiments résidentiels utiles à l'évaluation de l'exposition de la population à l'inondation.

Le rôle d'évaluation foncière mis à notre disposition est celui de 2015 et pas celui de 2011, l'année où l'inondation a eu lieu. Il en va de même pour le plan cadastral de la municipalité. S'il est peu probable que les numéros de lots de cadastre aient changé de manière importante en l'espace de 4 ans, les caractéristiques des bâtiments inscrites au rôle d'évaluation foncière peuvent avoir changé pour certains bâtiments. Il n'est en effet pas rare que des modifications importantes, telles que la surélévation du bâtiment, soient apportées aux bâtiments après une inondation de cette envergure. Des erreurs d'estimation de l'exposition de la population sont donc possibles.

Tableau 7.1: Disponibilité et caractéristiques des données nécessaires à l'application des méthodes sur la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu

	Données, dates et sources	Disponibilité	Échelle	Format
Vulnérabilité socio-économique	Recensement 2011 et ENM 2011 <i>Statistique Canada</i>	✓	Aire de diffusion	Tabulaire (format .ivt)
	Limites des aires de diffusion 2011 <i>Statistique Canada</i>	✓	Aire de diffusion	Polygones (fichier de formes)
Exposition de la population	Rôle d'évaluation foncière de 2015 <i>Municipalité</i>	✓	Unité d'évaluation (bâtiment)	Tabulaire (format .xls)
	Forme des bâtiments	X	X	X
	Plan cadastral de 2015 <i>Municipalité</i>	✓	Lot cadastral	Polygones (fichier de formes)
	Hauteurs d'eau <i>Méthode de cartographie de l'aléa inondation, chapitre 3</i>	✓	Par pixel	Matriciel (raster)
Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles	Forme des infrastructures essentielles	X	X	X
	Réseau Routier National 2016 <i>BNDT (RNCan)</i>	✓	Segment de route, échelle 1/20 000	Vecteurs (fichier de formes)
	Hauteurs d'eau <i>Méthode de cartographie de l'aléa inondation, chapitre 3</i>	✓	Par pixel	Matriciel (raster)

7.1.2 Localisation de la zone d'étude

La zone urbaine inondée sur laquelle la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain lié aux inondations a été appliquée à une superficie de 58 ha et est située au sud de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu (Figure 7.1). Cette zone, qui regroupe environ 1200 personnes selon les données de recensement, a été choisie car il s'agit d'un des quartiers de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu qui a été le plus touché par les inondations de 2011. Au maximum de la crue, plus de la moitié de la zone était en effet sous les eaux (les limites de la zone inondée sont indiquées en bleu sur la Figure 7.1). Sur les 362 bâtiments qui y sont présents, plus d'une centaine ont été inondés à différents niveaux, et de nombreux autres se sont retrouvés isolés par l'inondation.

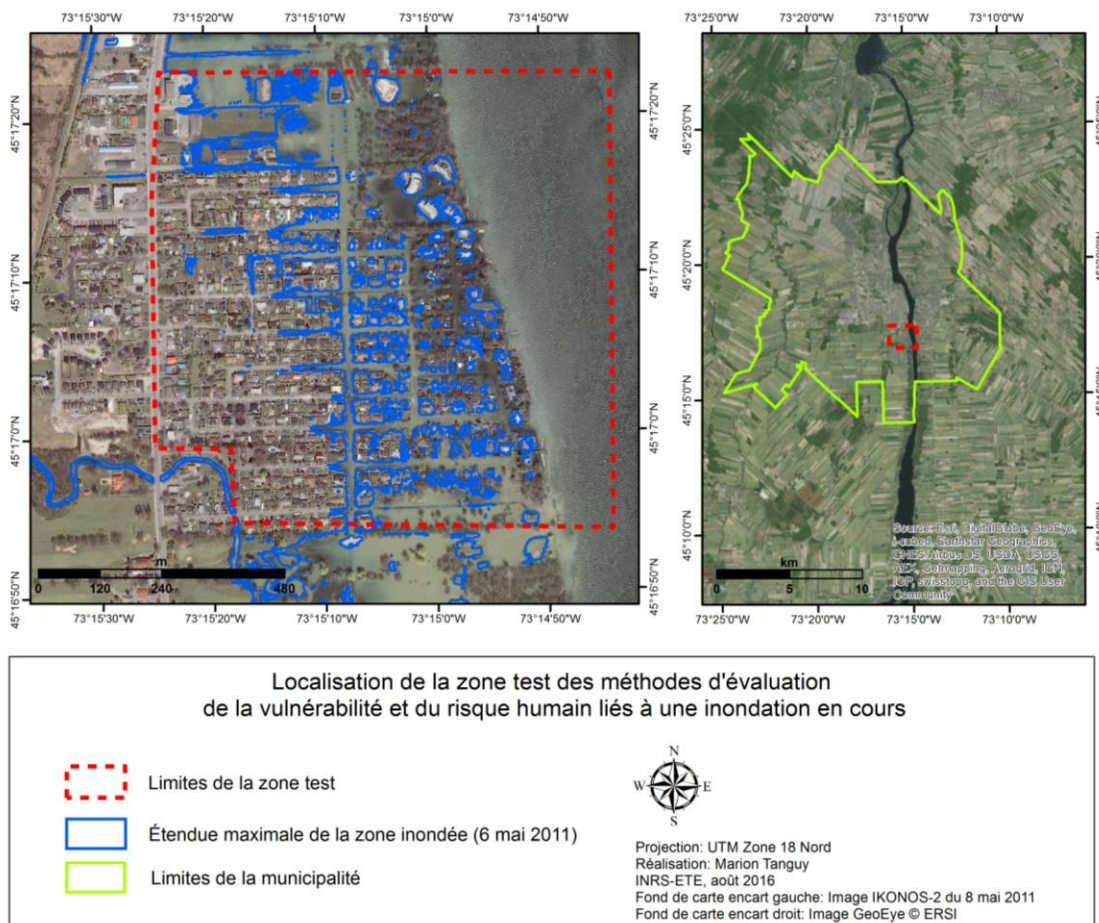


Figure 7.1: Localisation de la zone sur laquelle les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain liés aux inondations ont été testées

7.2 Résultats de l'évaluation et de la cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours

Les résultats de chaque composante de la vulnérabilité, à savoir la vulnérabilité socio-économique, l'exposition de la population et la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles, sont présentés et discutés de manière individuelle.

7.2.1 Vulnérabilité socio-économique

a) Estimation du poids des indicateurs de vulnérabilité socio-économique

Afin d'estimer les poids relatifs à chaque indicateur retenu pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation à l'aide de la méthode de l'AMH développée par Saaty (1980), il a tout d'abord été nécessaire de procéder à la comparaison par paire de ces indicateurs. Les résultats de cette première étape sont présentés au Tableau 7.2.

Tableau 7.2: Résultats de la comparaison par paire des indicateurs de vulnérabilité sélectionnés par les experts en sécurité civile

Indicateurs de vulnérabilité	Absence d'expérience	Personnes âgées (65 ans et plus)	Locataires du logement	Foyers à faibles revenus	Personnes isolées
Absence d'expérience	1	3	5	5	9
Personnes âgées (65 ans et plus)	1/3	1	3	3	9
Locataires du logement	1/5	1/3	1	3	5
Foyers à faibles revenus	1/5	1/3	1/3	1	3
Personnes isolées	1/9	1/9	1/5	1/3	1

Cette comparaison par paire a été réalisée à partir de l'ensemble des commentaires recueillis lors des entretiens avec les différents experts en sécurité civile. Afin de respecter au mieux le fort impact considéré par les experts de l'indicateur « Absence d'expérience » sur la vulnérabilité socio-économique, les degrés d'importance numérique choisis dans la comparaison par paire de cet indicateur avec les autres indicateurs de vulnérabilité sont élevés. Nous avons choisi de limiter l'utilisation des degrés numériques les plus forts (à savoir 7 et 9) lors de toutes les comparaisons par paires de cet indicateur avec les autres indicateurs de vulnérabilité, dans le but de ne pas minimiser l'importance de ces autres indicateurs dans l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi, on considère seulement comme « un peu plus important » (degré d'importance numérique de 3) ou « plus important » (importance numérique de 5) cet indicateur par rapport aux autres indicateurs de vulnérabilité. Seule la comparaison par paire avec l'indicateur « Personnes isolées » a ainsi un degré très élevé (9), l'utilisation elle-même de cet indicateur n'ayant pas été validée par tous les experts.

Les indicateurs « Locataires du logement » et « Foyers à faibles revenus » se voient attribuer des degrés d'importance similaires lors de la comparaison par paire avec d'autres indicateurs, pour respecter le fait qu'aucun de ces deux indicateurs n'a été clairement identifié comme plus important que l'autre par les experts. Enfin, afin d'insister sur la plus faible importance attribuée à l'indicateur « Personnes isolées », le degré d'importance numérique correspondant à une « importance absolument plus élevée » (importance numérique de 9) a été attribuée aux indicateurs « Absence d'expérience » et « Personnes âgées de 65 ans et plus » lors de la comparaison par paire. L'indicateur « Locataires du logement » a également été jugé « plus important » (importance numérique de 5) que l'indicateur « Personnes isolées », ce qui devrait renforcer le faible poids de cet indicateur.

Les poids calculés à partir de cette comparaison par paire sont présentés au Tableau 7.3. Ces poids respectent relativement bien les décisions des experts interrogés. L'indicateur « Absence d'expérience », qui a été cité de manière quasi-unanime par les experts comme l'indicateur ayant la plus forte influence sur la vulnérabilité socio-économique de la population, a ainsi un poids très élevé, proche de 0,5. L'indicateur « Personnes âgées de 65 ans et plus » a un poids légèrement moins élevé mais qui reste cependant haut, à 0,26. Son poids est ainsi plus élevé que celui des indicateurs « Locataires du logement » et « Foyers à faibles revenus », ce qui respecte encore une fois l'ordre d'influence défini par les experts, et qui a été présenté au Tableau 6.1 du chapitre précédent. L'indicateur « Locataires du logement », qui avait été placé par quelques experts après l'indicateur « Foyers à faible revenus » en termes d'influence sur la

vulnérabilité, a un poids de 0,14. Ce poids reste ainsi proche de celui de l'indicateur « Foyers à faible revenus », qui est de 0,08. Enfin, l'indicateur « Personnes isolées », dont l'influence sur la vulnérabilité socio-économique n'était pas évidente pour toutes les personnes interrogées, a un poids particulièrement faible de 0,03. Le poids de l'indicateur « Foyers à faibles revenus » aurait pu être un peu plus élevé, afin d'être plus proche de celui de l'indicateur « Locataire du logement » que de l'indicateur « Personnes isolées ». Cependant, les poids de ces trois indicateurs étant faibles, il est peu probable que cela ait un impact majeur sur les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique.

Tableau 7.3: Poids des indicateurs de vulnérabilité socio-économique

Indicateur	Absence d'expérience	Personnes âgées (65 ans et plus)	Locataires du logement	Foyers à faibles revenus	Personnes isolées
Poids (P)	0,49	0,26	0,14	0,08	0,03

La cohérence de ces jugements a enfin été analysée, à l'aide de l'Indice de Cohérence (IC) et du Ratio de Cohérence, proposés par Saaty (1977). L'IC estimé est de 0,097, et le RC est de 0,086. La cohérence de la comparaison par paire des indicateurs de vulnérabilité dérivée des entretiens étant inférieure à 0,1, elle est donc valide. Les poids attribués aux indicateurs de vulnérabilité socio-économique sont ainsi conservés, et seront utilisés pour évaluer cet aspect de la vulnérabilité dans la zone test.

Ces poids ayant été estimés sur la base du jugement de 10 experts en sécurité civile ayant l'expérience de la gestion de l'intervention lors d'inondations, et exerçant dans des municipalités de différentes tailles et aux caractéristiques socio-économiques différentes, on peut considérer qu'ils peuvent être utilisés lors de l'application de la méthode proposée au Québec, dans les autres provinces canadiennes et dans des pays aux caractéristiques socio-économiques similaires. Cependant, en cas de désaccord avec les jugements qui sont ici présentés ou lors d'applications dans des zones aux caractéristiques socio-économiques différentes, la modification de ces poids est possible. Cela implique cependant de réaliser une nouvelle étape

de comparaison par paires de ces indicateurs, d'en dériver les poids puis de les préciser dans l'outil d'évaluation de la vulnérabilité.

b) Évaluation et cartographie de la vulnérabilité socio-économique de la population

La Figure 7.2 présente la cartographie des niveaux de vulnérabilité socio-économique de la population dans la zone test.

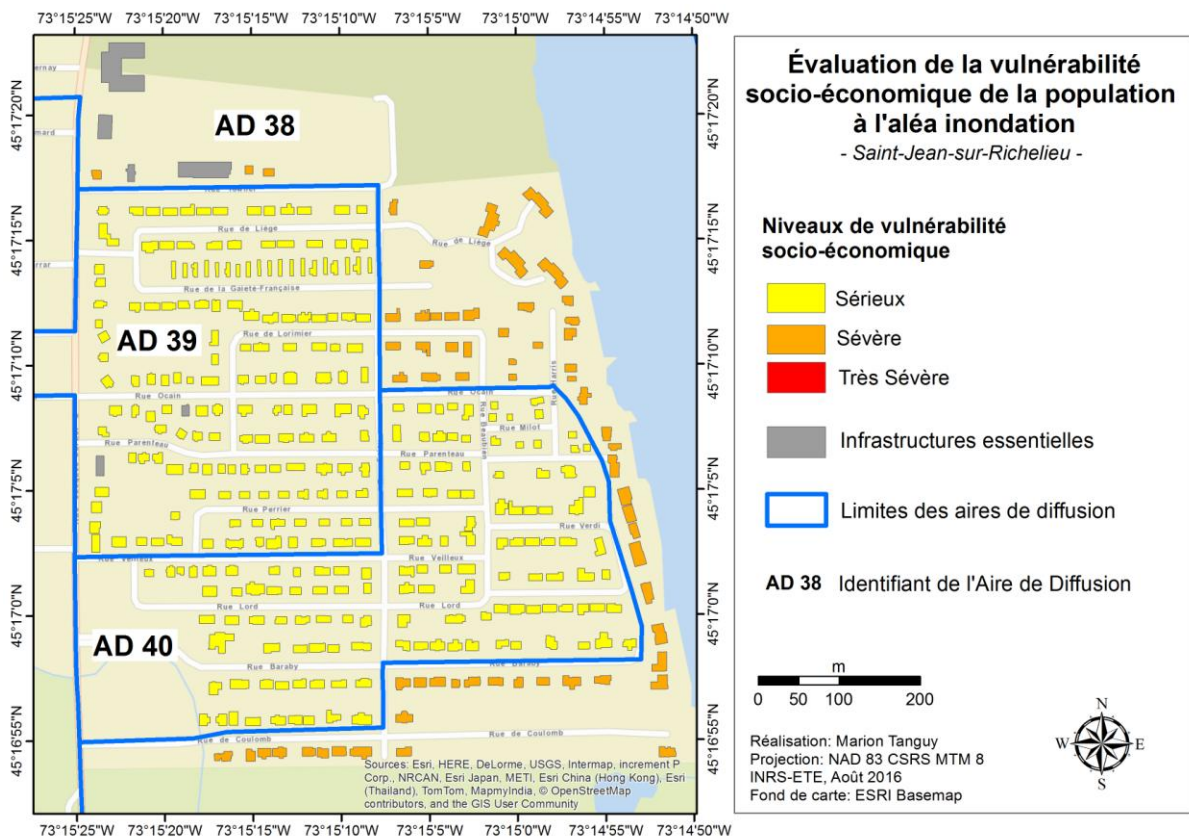


Figure 7.2: Résultats de l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation dans la zone test

Le fait que tous les bâtiments d'une même AD aient un niveau de vulnérabilité identique émane du fait, on le rappelle, que les données socio-économiques issues du recensement ne sont disponibles qu'à l'échelle de l'AD, et pas à celle du bâtiment. Les trois AD contenues dans la

zone d'étude sont délimitées à la Figure 7.2. Afin de simplifier leur citation dans les paragraphes suivants, elles seront désignées par leurs deux derniers numéros. On parlera ainsi de l'AD 38, de l'AD 39 et de l'AD 40.

Le niveau de vulnérabilité socio-économique évalué à partir de ces données est « Sérieux » pour les AD 39 et 40, leurs taux de vulnérabilité étant de 0,56 et de 0,86, respectivement. Le niveau de vulnérabilité socio-économique dans l'AD 38 est plus élevé, avec un niveau « Sévère », le taux de vulnérabilité y étant de 1,59. La population résidant dans l'AD 38 semble donc présenter des caractéristiques sociales et économiques qui la rendent plus vulnérable à une inondation. Pour comprendre ces résultats, les taux relatifs à chaque indicateur de vulnérabilité socio-économique par AD sont présentés dans le Tableau 7.4.

Tableau 7.4: Taux relatifs à chaque indicateur de vulnérabilité socio-économique, pour les 3 AD incluses dans la zone test

Indicateurs de vulnérabilité	AD 38	AD 39	AD 40
Absence d'expérience	19,8%	3,0%	21,1%
Personnes âgées (65 ans et plus)	22,0%	21,2%	17,8%
Locataires du logement	28,0%	15,0%	21,6%
Foyers à faibles revenus	27,5%	12,1%	6,7%
Personnes isolées	11,9%	8,0%	8,9%
<i>Taux de vulnérabilité avant classification</i>	1,59	0,56	0,86

Le Tableau 7.4 permet tout d'abord de constater que les taux relatifs aux différents indicateurs de vulnérabilité socio-économiques sont relativement bas et ne dépassent pas les 30%. La population de ces trois AD ne semble ainsi pas présenter de caractéristiques socio-économiques particulièrement marquées.

Il est intéressant de noter que l'AD 38, qui a le niveau de vulnérabilité socio-économique le plus élevé, ne présente pas le plus fort taux de personnes considérées comme n'ayant pas

l'expérience d'inondations dans la zone test, qui est l'indicateur de vulnérabilité ayant le poids le plus élevé. Il s'agit cependant du seul indicateur pour lequel l'AD 38 ne présente pas le plus fort taux. En effet, parmi les cinq indicateurs retenus pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation, quatre présentent des taux plus élevés dans l'AD 38 que dans les deux autres AD. Le niveau de vulnérabilité « Sévère » de la population de cette AD semble avoir été en particulier influencé par une présence plus importante de personnes locataires mais aussi de ménages à faibles revenus. Les poids relatifs de ces deux indicateurs n'étant pas les plus élevés, il semble également que ce soit l'écart important entre les taux de ces indicateurs entre l'AD 38 et les AD voisines qui a contribué à différencier les niveaux de vulnérabilité de ces trois AD. Enfin, les personnes âgées de plus de 65 ans, ainsi que les personnes isolées, sont légèrement plus nombreuses dans l'AD 38 qu'ailleurs dans la zone d'étude.

Les AD 39 et 40 ne présentent pas de caractéristiques socio-économiques ayant une influence majeure sur leur niveau de vulnérabilité. Les taux relatifs à chaque indicateur restent en effet assez bas, et ne démontrent pas de tendances particulières de la population. Les plus grands nombres de personnes n'ayant jamais fait l'expérience de phénomènes d'inondations et de personnes locataires de leur logement dans l'AD 40 ont influencé son taux de vulnérabilité socio-économique légèrement plus élevé que dans l'AD 38 (0,86 contre 0,56). Cependant, le faible taux de vulnérabilité de l'AD 39, aboutissant à un niveau de vulnérabilité « Sérieux », est en grande partie imputable au taux particulièrement bas (3%) de personnes considérées comme n'ayant pas l'expérience de phénomènes d'inondation dans la zone test.

Si la zone test ne présente pas de population ayant un niveau de vulnérabilité socio-économique « Très Sévère », d'autres zones de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, qui n'ont pas été cartographiées, présentent ce niveau. Pour comprendre comment un tel niveau peut être obtenu, nous avons choisi d'extraire les taux relatifs aux différents indicateurs de vulnérabilité socio-économique dans des AD présentant un niveau de vulnérabilité socio-économique « Très Sévère ». Ces taux sont présentés dans le Tableau 7.5.

Tableau 7.5: Taux des différents indicateurs de vulnérabilité socio-économique pour des AD présentant un niveau de vulnérabilité « Très Sévère »

Indicateurs de vulnérabilité	AD 24560182	AD 24560199	AD 25560331
Absence d'expérience	38,4%	31,9%	32,3%
Personnes âgées (65 ans et plus)	10,34%	16,7%	13,4%
Locataires du logement	86,6%	68,4%	87,2%
Foyers à faibles revenus	31,4%	41,6%	71,1%
Personnes isolées	24,1%	31,2%	23,7%
<i>Taux de vulnérabilité avant classification</i>	2,16	2,17	2,35

L'analyse de ce tableau permet de mettre en relief les taux très élevés, dépassant parfois les 80%, de certains indicateurs dans les AD ayant un niveau de vulnérabilité « Très Sévère ». Il est en très grande partie imputable aux taux particulièrement élevés de personnes locataires, mais aussi de ménages à faibles revenus. Ces AD concernent en effet des zones contenant en majorité des immeubles de 10 à 15 logements, construits dans les années 1970 et 1980 et ayant typiquement des loyers modérés. Si les personnes n'ayant jamais eu l'expérience d'inondation dans la zone habitée restent relativement peu nombreuses, elles le sont cependant davantage que dans les AD ayant un niveau de vulnérabilité « Sérieux » ou « Sévère » (Tableau 7.4). Ce plus fort taux est lié à la présence importante de personnes locataires, qui ont globalement tendance à rester moins longtemps dans leur logement que les personnes qui en sont propriétaires. Les personnes âgées de plus de 65 ans sont moins nombreuses dans ces zones au niveau de vulnérabilité socio-économique « Très Sévère » que dans les zones ayant une vulnérabilité « Sérieuse » ou « Sévère ». Le nombre de personnes vivant seules y est pourtant plus important. Ainsi, même s'il est souvent considéré que les personnes âgées vivent plus fréquemment seules que les personnes plus jeunes, parce qu'elles n'ont plus d'enfants à charge ou encore pour cause de veuvage, ces chiffres montrent qu'il n'est pas toujours pertinent de faire ce lien. L'utilisation d'un indicateur distinct, à savoir l'indicateur « Personnes isolées » est donc intéressant, même s'il a un faible poids.

Ces différents résultats montrent que les indicateurs de vulnérabilité socio-économique utilisés ainsi que les poids qui leur ont été attribués, permettent de bien distinguer les populations moins sensibles aux impacts de l'aléa des populations qui y sont plus sensibles. Dans son état actuel, la limite de cette approche réside ainsi avant tout dans les données disponibles pour évaluer cet aspect de la vulnérabilité. Les données de recensement, qui sont les seules largement et aisément disponibles pour évaluer la vulnérabilité socio-économique, n'autorisent en effet que son évaluation à l'échelle de l'AD. On doit donc se contenter d'analyses de tendances. Il n'est ainsi pas possible de connaître avec précision les caractéristiques des résidents d'un bâtiment ou d'un foyer. Or, ces caractéristiques changent parfois de manière très importante d'un foyer à un autre. L'utilisation de ces données de recensement induit donc un certains biais des résultats obtenus. L'autre limite majeure de ces données est qu'elles ne permettent pas de connaître précisément le nombre de personnes par bâtiment. Lors de la phase d'intervention, il ne sera donc pas possible de connaître le nombre exact de personnes concernées par chaque niveau de risque humain. On peut cependant considérer que l'analyse qui est ici offerte permet d'obtenir une information sur les tendances de la vulnérabilité socio-économique à l'intérieur de zones bien définies, et permettent ainsi aux intervenants d'établir globalement les besoins de ces populations lors d'une inondation.

Les données issues du recensement de la population sont celles les plus fréquemment utilisées dans la littérature pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population aux aléas d'origine naturelle ou anthropique (Chakraborty *et al.* (2005); Cutter *et al.* (2000); Kaźmierczak *et al.* (2011) ou encore Armaş *et al.* (2013)). En dépit de leur manque de précision, ces données sont très fréquemment mises à profit car elles sont parmi les seules aisément disponibles et fournissant un large ensemble d'informations sur les caractéristiques socio-économiques de la population partout dans le pays, avec une qualité contrôlée. De plus, il faut rappeler que si ces données de recensement ne sont diffusées que par Aire de diffusion, elles restent et devraient rester recueillies par foyer. Il existe donc bel et bien des données socio-économiques à l'échelle du foyer. Il n'est pas écarté que devant l'augmentation de la fréquence des phénomènes d'inondation et les implications de cette augmentation en termes de gestion du risque, ces données soient transmises aux gestionnaires de la sécurité civile, à condition que les conditions de confidentialité soient respectées.

7.2.2 Exposition de la population à l'inondation en cours

La zone sur laquelle la méthode a été appliquée est une zone à forte dominante résidentielle. Elle ne comporte que de rares infrastructures essentielles comme une école secondaire de premier cycle et une garderie, et deux commerces, tous situés dans sa partie ouest. Aucune infrastructure de gestion de crise ou fournissant des services de base à la population ne se trouve dans cette zone test.

Les bâtiments résidentiels qui y sont présents sont représentatifs de l'habitat résidentiel québécois construit au cours des années 1960 à 1980, avec une majorité de maisons détachées de plain-pied avec sous-sol. Selon le rôle d'évaluation foncière de la municipalité, on retrouve parmi les 354 bâtiments résidentiels présents dans cette zone 289 bâtiments avec sous-sol, 46 bâtiments sans sous-sol et 19 bâtiments unimodulaires.

Les bâtiments avec sous-sol, et ayant ainsi un premier plancher surélevé, y sont donc largement majoritaires. La Figure 7.3 permet cependant de remarquer que la plupart des bâtiments sans sous-sol (bâtiments en rouge sur la figure), et n'ayant ainsi pas un premier plancher surélevé, sont situés dans les secteurs les plus proches de la rivière, et qui ont été particulièrement touchés en 2011. Cette figure permet également de noter que toutes les résidences unimodulaires (en violet sur la figure) sont regroupées sur une seule et même rue.

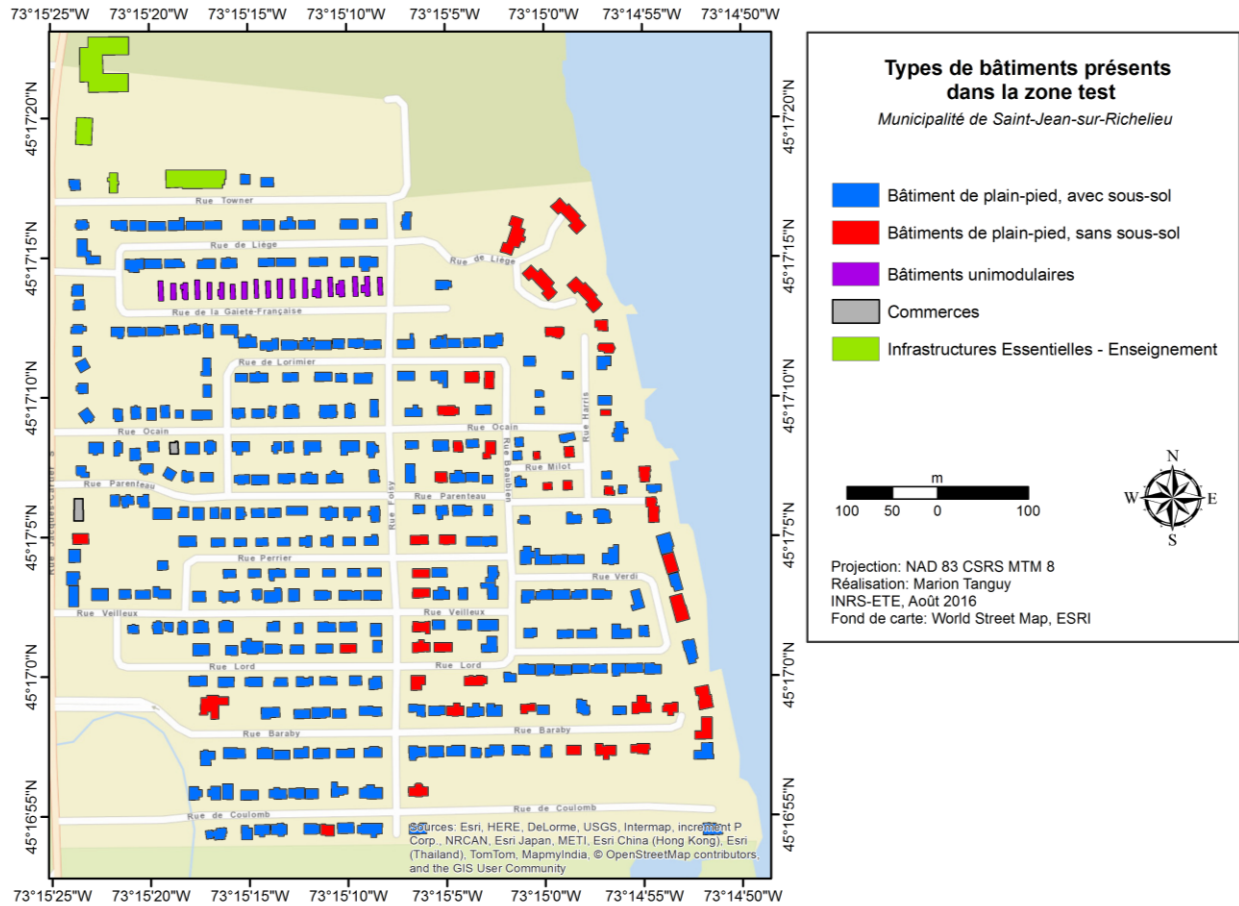


Figure 7.3: Cartographie des types de bâtiments présents dans la zone test

La Figure 7.4 présente la cartographie de l'exposition de la population au cours de l'inondation évaluée à l'échelle du bâtiment, le 1^{er} mai 2011.

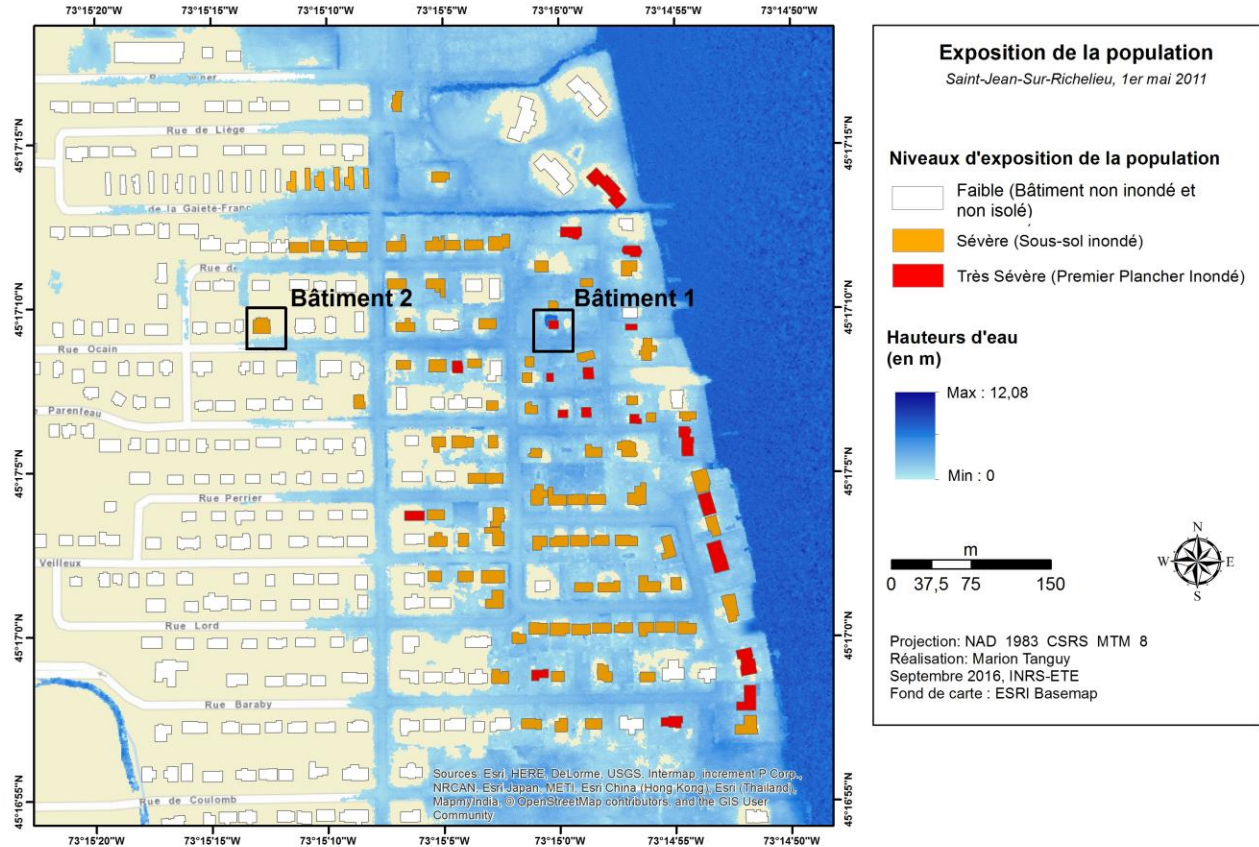


Figure 7.4: Évaluation de l'exposition de la population par bâtiment dans la zone test, le 1^{er} mai 2011

Selon l'outil, aucune des rares infrastructures essentielles ou des commerces présents dans la zone d'étude n'est touché par l'inondation. En effet, si l'inondation s'est beaucoup rapprochée des écoles situées au nord de la zone d'étude, seules les cours ou les stationnements situés autour de ces bâtiments sont inondés le 1^{er} mai 2011.

Cependant, parmi les 354 bâtiments résidentiels présents dans la zone test, 91 sont inondés, à divers niveaux. Parmi ces 91 bâtiments, 72 ont uniquement leur sous-sol inondé. Le niveau d'exposition des personnes résidant dans ces bâtiments est ainsi « Sévère ». On dénombre 19 bâtiments ayant un premier plancher inondé, et présentant ainsi un niveau d'exposition de la population « Très Sévère ».

Il est intéressant de noter que parmi ces 19 bâtiments ayant un premier plancher inondé, 18 sont des bâtiments sans sous-sol et ayant un niveau d'eau maximum au niveau du bâtiment compris entre 1 cm et 43 cm. Ainsi, seul un des 19 bâtiments ayant un premier plancher inondé

est un bâtiment avec sous-sol. Il est identifié comme le Bâtiment 1 sur la Figure 7.4. Le niveau d'eau maximum estimé au contact de ce bâtiment est de près de 1,4 m, ce qui explique pourquoi le sous-sol de ce bâtiment et aussi son premier plancher ont été inondés.

Une telle hauteur d'eau semble cependant étonnante dans cette zone test caractérisée par un relief très peu accentué. L'analyse des élévations du sol, obtenues grâce à des relevés LIDAR réalisés en 2013, montre cependant l'existence d'une « fosse » de près de 1 m de profondeur sur la partie Nord du bâtiment. Les images Google Street View© montrent également que ce bâtiment, qui ne possédait pas de sous-sol lors de l'inondation de 2011, en possédait un en 2015 (Figure 7.5).

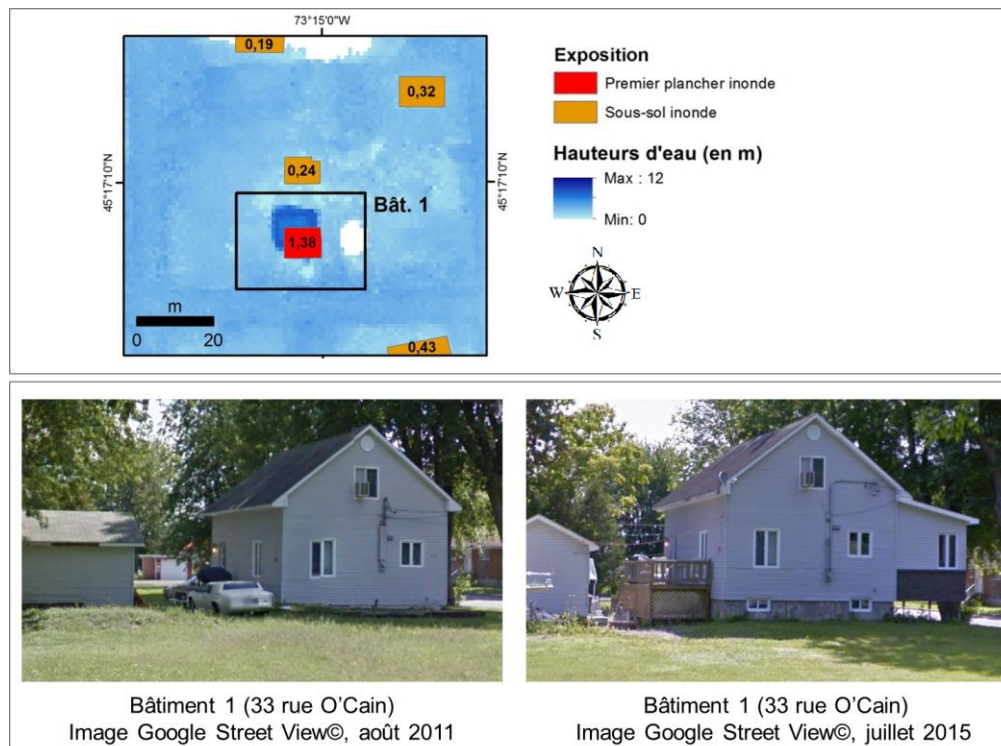


Figure 7.5: Modifications apportées au bâtiment 1 après l'inondation de 2011, et ayant engendré des erreurs d'estimation des niveaux d'eau dans le bâtiment

La fosse apparaissant sur les données LIDAR n'est également pas visible sur ces images. Celle-ci pourrait donc être temporaire et être due aux travaux importants qui étaient en cours sur le bâtiment lors de l'acquisition des données LIDAR. Ainsi, les caractéristiques du bâtiment

inscrites au rôle d'évaluation foncière utilisé pour cette étude de cas n'étant pas celles du bâtiment en 2011, et les élévations du terrain dérivées des données LIDAR n'étant pas non plus celles de 2011, il est plus que probable que la hauteur d'eau maximale au niveau du bâtiment n'était pas de 1,4 m le 1^{er} mai 2011. Cet exemple démontre l'importance d'utiliser des données générées à la date la plus proche possible de l'évènement d'inondation qui est analysé. L'application de cette méthode en phase d'intervention requiert donc l'utilisation de données récentes et régulièrement mises à jour.

Il est également étonnant de constater qu'un bâtiment situé à l'extrémité Ouest de la zone inondée, et entouré de bâtiments non inondés, a un niveau d'exposition jugé « Sévère ». Ce bâtiment est identifié comme le Bâtiment 2 sur la Figure 7.4. Ce niveau d'exposition est dû à la présence d'une zone inondée d'environ 40 m², distante d'une vingtaine de mètres du reste de la zone inondée mais touchant les limites du bâtiment, et qui induit une hauteur d'eau de 29 cm au niveau du bâtiment. L'analyse de l'orthophotographie acquise le 30 avril 2011 n'a pas permis de déterminer si de l'eau était bien présente au niveau du bâtiment, la zone inondée touchant le bâtiment étant masquée par son ombre. Étant donné que cette zone inondée n'est pas reliée directement au reste de la zone inondée et qu'elle est de petite taille, il est possible que sa présence résulte d'une erreur de cartographie des zones inondées. Il n'est cependant pas possible de confirmer cette hypothèse.

La Figure 7.6 permet de visualiser les variations spatiales des hauteurs d'eau au niveau des bâtiments inondés.

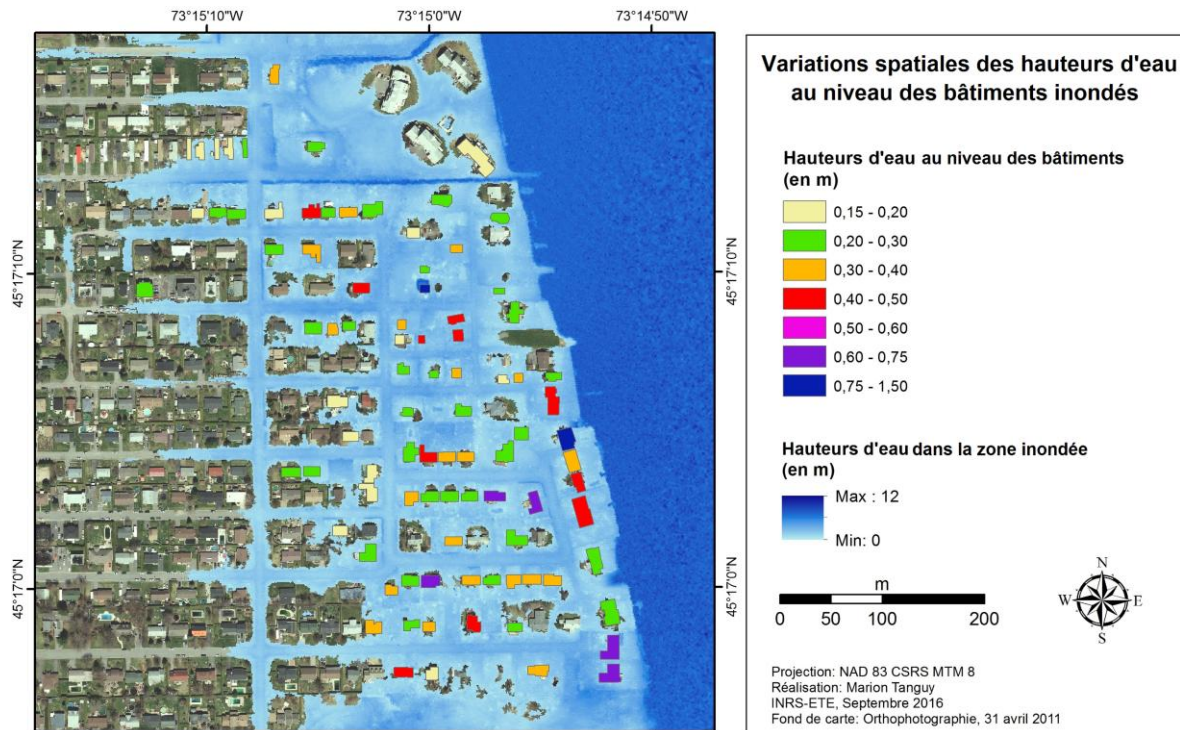


Figure 7.6: Variations spatiales des hauteurs d'eau dans les bâtiments inondés

Ces hauteurs d'eau dépassent très rarement les 80 cm, ce qui explique pourquoi seuls les résidents de bâtiments sans sous-sol ont un niveau d'exposition « Très Sévère » à l'inondation. De plus, les hauteurs d'eau ne diminuent pas systématiquement quand on s'éloigne de la rivière, mais peuvent varier de manière significative d'un bâtiment à un autre, et cela même si ces bâtiments sont voisins.

Deux bâtiments voisins présentant des caractéristiques architecturales identiques peuvent donc être touchés de manière différente par l'inondation : l'exposition des résidents de ces bâtiments peut ainsi varier de manière importante. Ces importantes variations spatiales des hauteurs d'eau, dans cette zone caractérisée par de faibles dénivelés, démontrent l'importance de considérer les caractéristiques de l'aléa au niveau de chaque bâtiment. Généraliser ces caractéristiques à l'ensemble de la zone inondée ou à des sections de cette zone inondée, sur la base par exemple de zones de récurrence d'inondation ou encore selon la distance à la rivière, peut donc induire des erreurs importantes dans l'estimation de l'exposition de la population.

Enfin, on peut voir sur la Figure 7.7 que les résidents de deux bâtiments au niveau desquels la hauteur d'eau est identique ou proche peuvent avoir un niveau d'exposition différent, puisqu'ils ne résident pas dans des bâtiments ayant les mêmes caractéristiques. Les résidents du bâtiment sans sous-sol sont en contact direct avec les eaux alors que les résidents du bâtiment avec sous-sol sont relativement protégés.

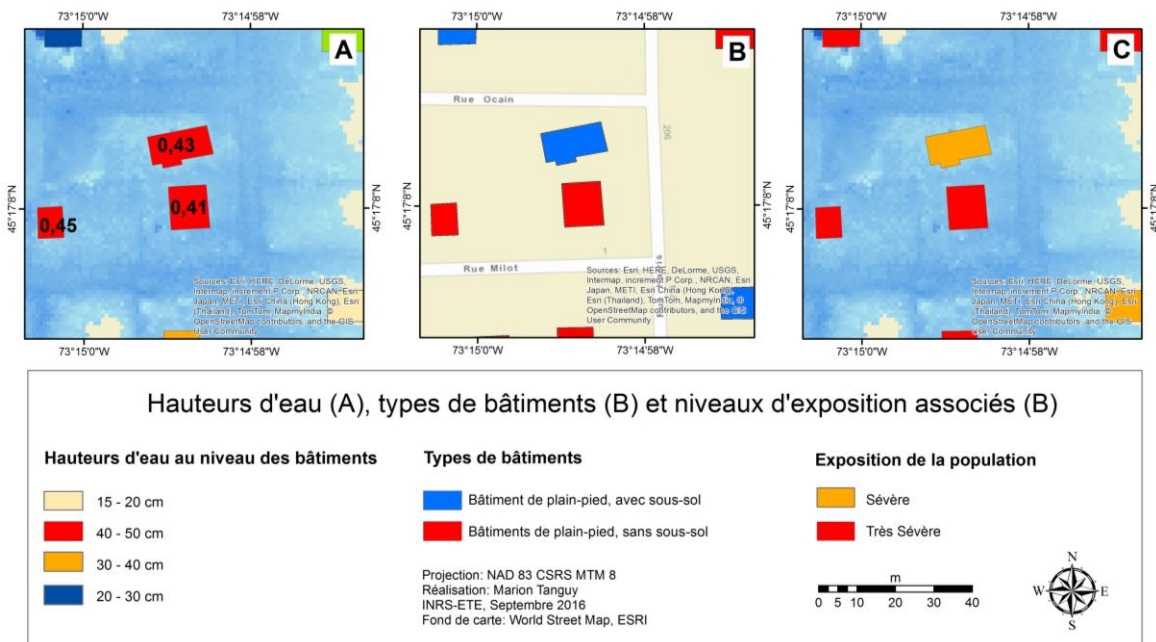


Figure 7.7: Types de bâtiments, hauteurs d'eau et niveaux d'exposition associés

Cet exemple permet d'illustrer l'intérêt de ne pas se baser uniquement sur les hauteurs d'eau dans la zone inondée pour estimer l'exposition de la population, mais aussi de prendre en compte les caractéristiques de chaque bâtiment résidentiel. Le fait que la hauteur d'eau au niveau de deux bâtiments différents soit similaire ou proche ne signifie en effet pas que les personnes qui y résident soient exposées de la même manière à l'aléa. Une même hauteur d'eau peut en effet induire dans certains cas l'inondation du sous-sol d'un bâtiment, et dans d'autres l'inondation du premier plancher.

7.2.3 Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

L'évaluation de la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles s'est concentrée uniquement sur l'isolement de la population induit par l'inondation du réseau routier. La Figure 7.8 présente une cartographie des bâtiments résidentiels non inondés mais isolés par l'inondation, ainsi que des segments de route inondés.

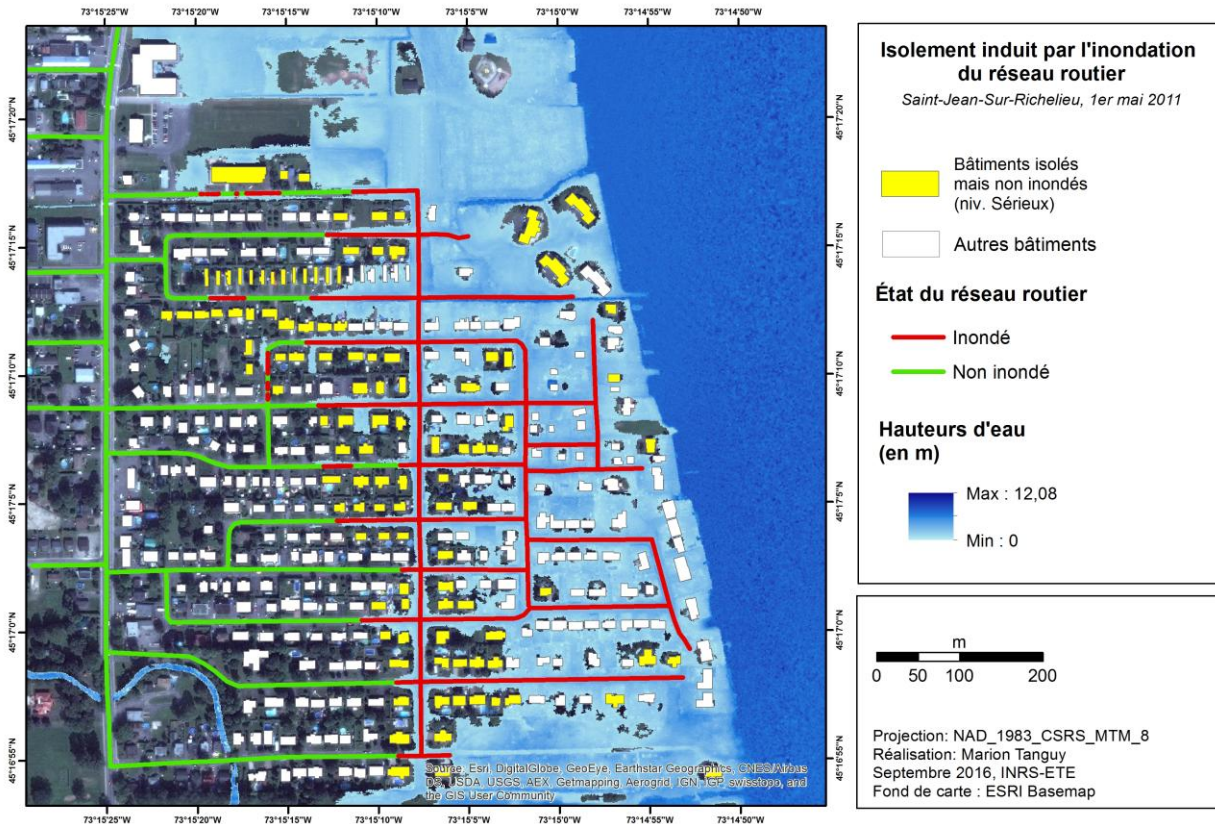


Figure 7.8: Cartographie des bâtiments résidentiels isolés par l'inondation et des segments de routes inondés

Parmi les 354 bâtiments présents dans cette zone test, il est estimé que 117 ne sont pas inondés mais sont isolés, toutes les routes y donnant accès étant inondées le 1^{er} mai 2011. Seul un de ces bâtiments isolés est une infrastructure essentielle, à savoir une école située dans le nord de la zone d'étude.

La plupart des bâtiments résidentiels isolés se trouvent dans la partie Ouest de la zone inondée, dans des endroits où l'eau a envahi les routes, mais n'a pas une hauteur suffisante pour atteindre les terrains légèrement surélevés entourant les bâtiments. La Figure 7.8 montre

également que des bâtiments situés dans la partie Est de la zone inondée, qui est la zone dans laquelle se situent la plupart des bâtiments inondés, sont aussi considérés comme isolés. Dans certains cas, c'est la légère surélévation des terrains sur lesquels reposent ces bâtiments qui leur a permis de ne pas être inondés, et ainsi d'être cartographiés comme isolés. C'est par exemple le cas des bâtiments 3 et 4 identifiés sur la Figure 7.9. Dans d'autres cas, des bâtiments considérés comme isolés semblent être en contact direct avec la zone inondable, ce qui nous laisse supposer qu'ils sont en réalité inondés (pour exemple, voir les bâtiments 5 et 6 sur la Figure 7.9). L'analyse des hauteurs d'eau maximales estimées dans ces bâtiments résidentiels montre cependant que celles-ci y sont soit nulles, soit inférieures à 15 cm, dans le cas des bâtiments sans sous-sol. Il est donc normal que ces bâtiments soient cartographiés comme isolés.

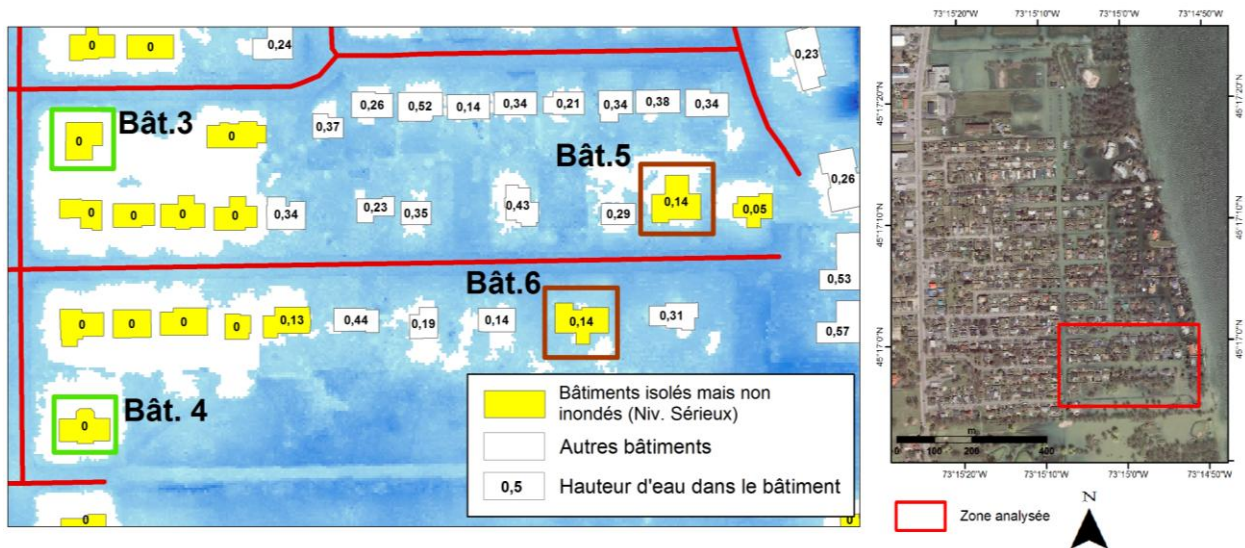


Figure 7.9: Analyse des hauteurs d'eau dans des bâtiments isolés mais considérés comme non inondés

Ainsi, la présence de bâtiments à l'intérieur de la zone touchée par l'inondation n'induit pas de manière systématique leur inondation. Le fait que le tiers des bâtiments de la zone d'étude soient isolés par l'inondation à la date analysée montre également que ces bâtiments peuvent être particulièrement nombreux. Leur prise en compte dans un outil d'aide à la décision est donc particulièrement pertinente.

Cette méthode d'identification des bâtiments isolés présente toutefois des limites. En effet, quelques rares bâtiments, tels que les bâtiments 7 et 8 (Figure 7.10) sont considérés comme isolés alors qu'il semble évident qu'il est possible d'évacuer ce bâtiment par la route, celle-ci n'étant pas entièrement inondée.



Figure 7.10: Identification de bâtiments non inondés mal identifiés comme « isolés »

Ce problème semble être lié au fonctionnement de l'outil « Network Analyst » d'ArcGis, qui a été utilisé pour simuler les itinéraires possibles entre les bâtiments et un point situé à l'extérieur de la zone inondée. Sa source n'a pas pu être trouvée. On constate cependant que les erreurs générées restent relativement limitées, seuls trois bâtiments étant concernés par ce problème dans la zone d'étude. La Figure 7.10 illustre une autre sorte d'erreur, induisant la mauvaise cartographie de bâtiments non isolés. Des bâtiments pour lesquels l'évacuation à partir du bâtiment pourrait se faire par deux routes différentes se voient en effet être cartographiés comme isolés alors qu'une seule de ces deux routes est inondée. C'est le cas du bâtiment 9. Ce genre d'erreurs serait dû au fait que l'outil « Network Analyst » se contente de considérer qu'un bâtiment est « connecté » à une seule route, en l'occurrence la route la plus proche de ce bâtiment. Il ne considère ainsi pas de connections secondaires avec des routes plus éloignées mais pourtant utilisables. C'est une autre des limites de cet outil. L'algorithme de simulation des routes de « Network Analyst » étant entièrement automatisé, il est difficile d'en modifier les

caractéristiques. Si l'utilisation d'un autre outil pour la simulation des routes permettant d'évacuer les bâtiments pourrait être envisagée, on doit souligner que les erreurs de ce type restent très peu nombreuses pour la zone test.

Enfin, il est possible d'afficher sur la carte les hauteurs d'eau maximales estimées sur les segments de route inondés, comme le montre la Figure 7.11. Les services de secours peuvent ainsi savoir si les véhicules à leur disposition peuvent circuler sur ces rues, ou s'il est plus pertinent et plus sécuritaire d'accéder aux zones touchées par bateau. Il est intéressant de noter que les routes les plus proches de la rivière ne sont pas celles sur lesquelles la hauteur d'eau maximale est la plus importante, comme le montre la Figure 7.11. Certains segments de route plus à l'Ouest de la zone inondée présentent en effet les hauteurs d'eau les plus élevées. Cette information est utile, car on peut avoir tendance à considérer que plus on s'approche de la rivière, plus les hauteurs d'eau augmentent. Cet exemple montre cependant que ce n'est pas toujours le cas.

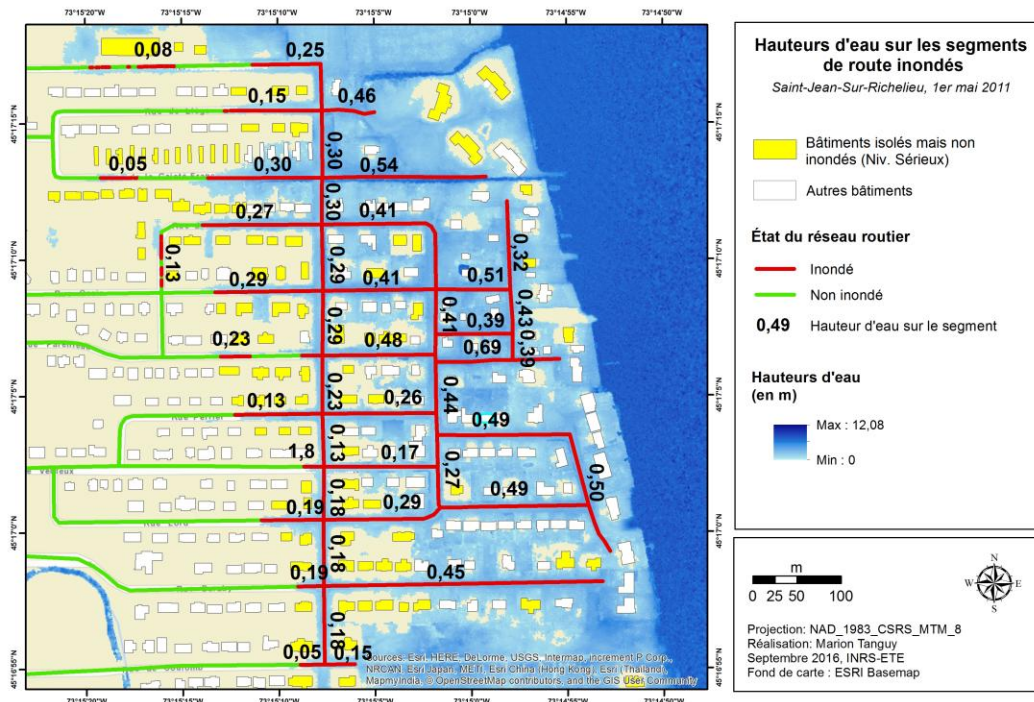


Figure 7.11: Hauteurs d'eau sur les segments de route inondés

Dans son état actuel, l'outil ne permet d'extraire les hauteurs d'eau que sous la ligne représentant la route. Seule une petite partie des pixels de la matrice des hauteurs d'eau recouvrant réellement la route est donc utilisée pour estimer la hauteur d'eau maximale sur celle-ci. Il est donc possible que la hauteur d'eau maximale réelle soit sous-estimée. Étant donné qu'il n'existe pas de données largement disponibles représentant l'emprise spatiale réelle du réseau routier, une solution alternative pourrait être de créer une zone tampon autour de la ligne représentant la route, en adaptant le diamètre de cette zone tampon au type de route. On pourrait alors réaliser l'analyse des hauteurs d'eau maximales sur toute la largeur des segments de route.

7.2.4 Risque humain lié à une inondation en cours

L'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité humaine liée à l'inondation en cours le 1^{er} mai 2011 a permis d'évaluer le niveau de risque humain lié à cet événement d'inondation. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une carte des niveaux de risque humain à l'échelle du bâtiment (Figure 7.12).

Selon cette évaluation, les résidents de 19 bâtiments présentent un niveau de risque humain « Très Sévère », et devraient donc nécessiter une attention très particulière de la part des services de la sécurité civile lors de la gestion de l'intervention. La vulnérabilité socio-économique de la population étant « Sérieuse » ou « Sévère » dans la zone d'étude, et la vulnérabilité induite par l'inondation du réseau routier se limitant à un niveau « Sérieux », ce très haut niveau de risque humain est dû au niveau d'exposition de la population à l'aléa. Les 19 bâtiments présentant ce niveau de risque sont en effet des bâtiments sans sous-sol, et dont le premier plancher est inondé à la date analysée.

Les résidents présentant un niveau de risque humain « Sévère » sont plus nombreux, puisque 107 bâtiments présentent ce niveau de risque. Selon la localisation de ces bâtiments dans la zone d'étude, ce niveau de risque peut être dû à l'influence de deux composantes de la vulnérabilité.

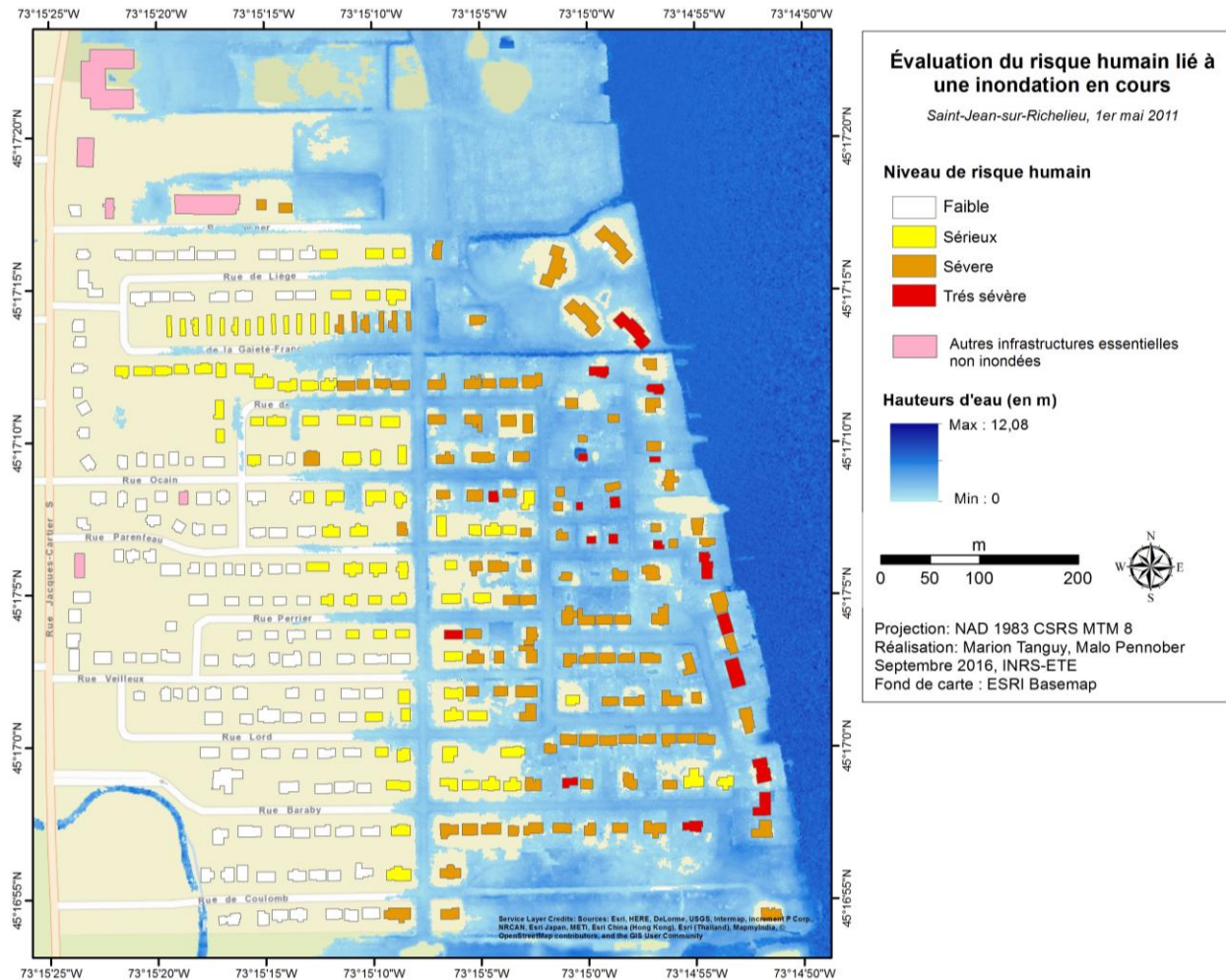


Figure 7.12: Évaluation du niveau de risque humain lié à l'inondation en cours dans la zone d'étude, le 1^{er} mai 2011

Dans la partie Est de la zone d'étude correspondant à l'AD 38, ce niveau de risque est dû, pour les bâtiments non inondés mais isolés par l'inondation, au niveau de vulnérabilité socio-économique de la population, qui a été évalué comme « Sévère ». Pour les autres bâtiments de cette partie Est, ce niveau de risque est dû à la fois au niveau de vulnérabilité socio-économique « Sévère » et au niveau d'exposition de la population, lui aussi « Sévère ». Enfin, dans le reste de la zone d'étude, où le niveau de vulnérabilité socio-économique est « Sérieux », ce niveau de risque est dû exclusivement au niveau d'exposition de la population à l'aléa, et ainsi à l'inondation des sous-sols des bâtiments résidentiels.

Les résidents de 101 bâtiments présentent un niveau de risque humain « Sérieux » à l'aléa en cours. Encore une fois, ce niveau de risque « Sérieux » est lié à deux composantes de la

vulnérabilité, à savoir la vulnérabilité socio-économique de la population et la vulnérabilité induite par l'isolement de la population. On est donc en présence d'une population présentant une sensibilité relativement faible à l'aléa et à ses impacts, et se trouvant dans des bâtiments non inondés, mais isolés par l'inondation.

L'analyse de la cartographie des niveaux de risque humain lié à l'inondation en cours (Figure 7.12) permet de remarquer que le risque humain, tel qu'il est analysé dans cette étude, peut varier de manière importante d'un bâtiment à un autre. En effet, des bâtiments voisins présentent des niveaux de risque différents, allant de « Sérieux » à « Très Sévère », voir même de « Faible » à « Très Sévère », selon la ou les composantes de la vulnérabilité ayant le plus d'influence. Ces résultats démontrent que l'évaluation du niveau de risque humain doit être réalisée à une échelle fine, telle que celle du bâtiment, et ne doit pas être généralisée à l'intérieur de larges zones. Le fait que selon le bâtiment, le niveau de risque humain est influencé par différentes composantes de la vulnérabilité, et varie ainsi d'un bâtiment à un autre, montre également qu'intégrer différentes composantes de la vulnérabilité humaine à l'évaluation du risque permet d'obtenir une analyse plus fine du risque humain. Ces différents niveaux de risque en cours pour la population, et leurs différentes implications en termes de santé et de sécurité de la population, ne pourraient en aucun cas être définis à l'aide d'une simple visite de la zone par hélicoptère ou par canot. L'outil proposé permet ainsi d'identifier, de cibler les zones où des interventions sont nécessaires et ainsi de mieux définir le type et l'ampleur de ces interventions, et plus globalement les besoins opérationnels liés à l'inondation en cours. Enfin, on doit souligner que les variations spatiales importantes du niveau de risque humain qui ont été ici observées seraient encore plus marquées si des données relatives aux caractéristiques de la population étaient disponibles à l'échelle du foyer et non pas à l'échelle de l'AD, comme c'est le cas actuellement.

7.3 Potentiel d'utilisation des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque en phase d'intervention

Cette dernière sous-section discute du potentiel d'utilisation lors d'une phase d'intervention des méthodes proposées et de l'outil d'aide à la décision qui en est dérivé. On présentera tout d'abord les caractéristiques principales de cet outil, puis on discutera de ses limites. Enfin, des pistes d'amélioration des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain seront proposées.

7.3.1 Caractéristiques de l'outil d'aide à la décision

La méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours a été développée dans le but d'être utilisée de manière opérationnelle lors de la phase d'intervention. Toutes les étapes de cette méthode ont été implantées dans un seul et même outil, qui permet à ses utilisateurs d'obtenir une cartographie du niveau de risque humain bâtiment par bâtiment, telle que celle présentée à la Figure 7.12. Les cartes relatives à chaque dimension de la vulnérabilité peuvent également être générées par cet outil. Ces cartes sont simples et n'utilisent à chaque fois que quatre niveaux de vulnérabilité ou de risque, afin d'en simplifier la lecture et la compréhension.

Dans le but encore une fois de faciliter la compréhension des résultats obtenus, mais aussi leur exploitation, ceux-ci sont également présentés sous forme tabulaire. L'information sur les adresses des bâtiments permet à l'utilisateur de localiser avec précision les bâtiments dont les résidents peuvent avoir besoin d'assistance. Cette table contient également l'information sur le niveau de risque par bâtiment, ainsi que les quelques informations permettant à l'utilisateur de comprendre quelles sont les composantes de la vulnérabilité ayant influencé le niveau de risque. L'exposition de la population, sa vulnérabilité socio-économique, mais aussi la hauteur d'eau au niveau du bâtiment sont donc renseignés pour chaque adresse, comme le montre l'exemple donné à la Figure 7.13. On doit souligner que pour faciliter la lecture des résultats, l'information relative à l'isolement des bâtiments induit par l'inondation du réseau routier est incluse dans les informations sur l'exposition de la population.

OID	ID_bat	Adresse du bâtiment	Niveau de risque humain	Exposition de la population	Statut du bâtiment	Hauteur d'eau bâtiment	vulnérabilité de la population	
238	257	83.0 RUE LORD	Normal		Non_inonde	0	Serieux	
254	273	82.0 RUE LORD	Normal		Non_inonde		0	Serieux
83	100	82.0 RUE DE LORMIER	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
77	94	81.0 RUE OCAIN	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
40	56	81.0 RUE DE LORMIER	Severe	Sous-sol inonde	Inonde	0.18		Serieux
104	121	80.0 RUE OCAIN	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
31	46	80.0 RUE DE LIÈGE	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
310	329	80.0 RUE DE COULOMB	Normal		Non_inonde		0	Severe
222	241	8.0 RUE VERDI	Severe	Sous-sol inonde	Inonde	0.34		Serieux
317	336	8.0 RUE DE COULOMB	Severe	Isolé	Non_inonde		0	Severe
262	281	8.0 RUE BARABY	Severe	Sous-sol inonde	Inonde	0.57		Severe
196	214	79.0 RUE VEILLEUX	Normal		Non_inonde		0	Serieux
134	151	79.0 RUE PARENTEAU	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
11	13	79.0 RUE DE LIÈGE	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux
236	255	78.0 RUE VEILLEUX	Normal		Non_inonde		0	Serieux
195	213	78.0 RUE PERRIER	Serieux	Isolé	Non_inonde		0	Serieux

Figure 7.13: Exemple de table générée par l'outil d'évaluation du risque humain à une inondation en cours

L'ensemble des informations sur l'état du réseau routier et sur les hauteurs d'eau maximales par segment de route sont également disponibles, sous forme de cartes et de tables.

Enfin, des efforts ont été faits pour faciliter la génération des résultats de l'évaluation du risque humain et leur exploitation. La méthode proposée a ainsi été entièrement automatisée. Elle est intégrée dans un script Python, un langage de programmation objet utilisé par plusieurs logiciels de SIG. Ce langage est également celui utilisé pour l'automatisation de la méthode d'estimation des hauteurs d'eau en zone inondée présentée au Chapitre 3, ce qui évite d'avoir recours à des langages différents pour générer les données de hauteurs d'eau puis pour les exploiter pour l'évaluation et la cartographie du risque humain.

Afin de rendre la méthode d'évaluation du risque plus facilement exploitable par ses utilisateurs potentiels, une « Boîte à outils » a également été créée dans le logiciel ArcGis v10.3. Celle-ci permet de guider l'utilisateur pas à pas dans la réalisation des différentes étapes de traitement menant à la production de la carte finale du risque humain lié à l'inondation en cours. A chaque étape de traitement, il suffit ainsi à l'utilisateur de spécifier les données nécessaires à l'évaluation dans la zone analysée, puis de lancer les traitements. A titre d'exemple, la Figure 7.14 présente la fenêtre associée à l'outil permettant de réaliser l'évaluation et la cartographie du risque humain.

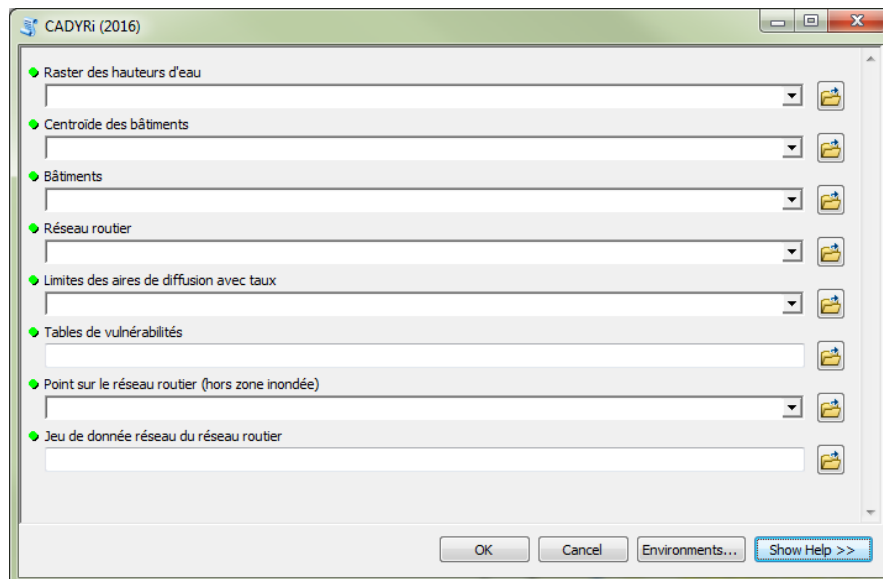


Figure 7.14: Exemple de fenêtre associée à un des outils de la « boîte à outils » regroupant l'ensemble des traitements menant à l'évaluation et à la cartographie du risque humain lié à une inondation en cours

L'intégration de cet outil dans un logiciel de SIG, à savoir ArcGis v10.3, permet à l'utilisateur de réaliser des requêtes attributaires, c'est-à-dire de ne sélectionner que certains types d'informations parmi toutes celles générées. On peut par exemple obtenir les informations liées exclusivement aux bâtiments dont les résidents présentent un niveau de risque humain « Très Sévère », et générer une carte ne présentant que les bâtiments regroupant cette catégorie de résidents, et la table attributaire associée. L'utilisateur peut ainsi adapter les informations générées par l'outil à ses besoins.

Enfin, les temps de traitement nécessaires à l'évaluation et à la cartographie du risque humain restent compatibles avec les contraintes temporelles liées à la gestion de crise, puisque moins de 15 min ont été nécessaires à la réalisation de l'ensemble des traitements sur un ordinateur Intel © Core™ i7 CPU, 3.6 GHz, avec 36 Go de RAM, pour la zone d'étude de 58 ha sur laquelle la méthode a été appliquée. Ces temps de traitement dépendent bien sûr de la taille de la zone d'étude. On doit ainsi s'attendre à des temps de traitement plus élevés pour des zones d'études d'une plus grande superficie. Cependant, ces temps de traitement n'incluent pas les temps nécessaires à la génération des données de hauteurs d'eau utilisées, qui sont dérivées de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées. Si on prend en compte l'ensemble de ces étapes, les temps de traitement associés à cette méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours devraient donc être plus longs (plusieurs heures), selon la taille de la zone d'étude et le matériel utilisé.

7.3.2 Limites à l'utilisation opérationnelle de l'outil d'aide à la décision

Tel que montré à la section précédente, les méthodes développées permettent d'obtenir une évaluation précise du risque humain lié à une inondation en cours. Malgré leurs avantages, elles présentent certaines limites, qui pourraient restreindre l'utilisation opérationnelle de l'outil proposé.

Une des principales limites est liée au fait que les données nécessaires à l'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité sont assez nombreuses et ont des sources différentes. Si certaines données sont disponibles librement sur des sites Internet gouvernementaux, d'autres ne sont accessibles que sur demande auprès de services gouvernementaux et municipaux. Certaines données, telles que les rôles d'évaluation foncière ou les plans cadastraux, doivent ainsi être récoltées municipalité par municipalité, ce qui peut prendre un temps considérable si on cherche à appliquer l'outil à de vastes territoires.

Ces données doivent ensuite être prétraitées pour répondre aux exigences des méthodes développées (fichiers en format .xls, géoréférencement des données géospatiales dans un même système de référence, etc.), ce qui peut là encore prendre du temps. Enfin, l'exemple d'application de la méthode présentée sur une zone inondée de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu a montré que les données relatives à la forme et à l'emplacement des bâtiments et des infrastructures essentielles, et prenant la forme de polygones géoréférencés, ne sont pas toujours disponibles. Ces données étant indispensables au fonctionnement de l'outil, il est alors nécessaire de les générer manuellement, ce qui peut être long. On comprend ainsi que les méthodes présentées ne peuvent pas être appliquées dans des délais corrects lors d'une inondation si l'ensemble des données requises n'a pas été préalablement regroupé et prétraité. L'application opérationnelle de ces méthodes en phase d'intervention nécessite donc d'être anticipée.

Un facteur qui pourrait restreindre l'utilisation de ces méthodes et de l'outil qui en est issu est qu'ils utilisent des outils du logiciel ArcGis v10.3, qui est un logiciel payant sous licence, et qui n'est pas utilisé par tous les services de sécurité civile, en particulier au niveau municipal. La modification des méthodes présentées, pour les rendre entièrement exploitables sur un logiciel de SIG à licence publique, semble donc nécessaire.

7.3.3 Améliorations potentielles des méthodes et de l'outil d'aide à la décision

Les résultats présentés à la section 7.2 et les réflexions qui en découlent nous ont permis de mettre en relief certaines des insuffisances des méthodes, et d'identifier certains aspects dont la prise en compte pourrait améliorer la précision des résultats de l'évaluation du risque.

Des améliorations de la méthode d'identification des bâtiments isolés sont par exemple à prévoir, puisque l'outil « Network Analyst » d'ArcGis qui est actuellement mis à profit pour cette identification génère des erreurs.

L'avis des experts consultés dans le cadre de ce travail nous a également amené à considérer que l'inondation du sous-sol d'un bâtiment induit un niveau d'exposition de la population moins important que lorsque le premier plancher du bâtiment est inondé. Or, dans certains bâtiments, il est fréquent que le sous-sol (ou demi sous-sol) soit occupé par un ou par plusieurs logements. L'inondation du sous-sol du bâtiment induit alors l'exposition directe des personnes qui vivent dans ces logements. Le niveau d'eau peut de plus y être particulièrement élevé, ce qui

engendre des risques très élevés pour la sécurité des résidents. Il serait donc particulièrement pertinent d'identifier les bâtiments possédant des logements en sous-sol ou en demi-sous-sol, et d'intégrer cette caractéristique à l'évaluation de l'exposition de la population. Cependant, le rôle d'évaluation foncière, qui est utilisé actuellement par l'outil pour définir les caractéristiques du bâtiment utiles à l'évaluation de l'exposition de la population, ne semble pas contenir d'information permettant d'identifier avec certitude les bâtiments possédant un sous-sol occupé par un ou par des logements. D'autres sources de données permettant d'intégrer cet aspect à l'outil doivent donc être recherchées.

Dans le même genre d'idée, il pourrait être pertinent de tenir compte du nombre d'étages du bâtiment dans l'évaluation de l'exposition de la population. Comme on l'a souligné dans la section 6.1.3, la présence d'un étage supérieur au premier plancher peut permettre aux résidents d'un bâtiment inondé de disposer d'un refuge en attendant l'arrivée des secours. En son absence, les résidents restent en contact direct avec les eaux d'inondation, ce qui comporte des risques pour leur sécurité (on pense notamment au risque d'électrocution). Certains auteurs tels que Provitolo (2007), Mercier *et al.* (2012) ou encore de Lumbroso *et al.* (2011b), ont déjà souligné l'intérêt de prendre en compte cet aspect, mais uniquement dans des scénarios d'inondation éclair, durant lesquels la présence d'un refuge dans le bâtiment peut permettre à la population de garder la vie sauve. Dans le cas d'inondations fluviales, généralement lentes et laissant à la population la possibilité d'évacuer le bâtiment, l'intérêt de l'intégration de cet aspect à l'évaluation de l'exposition pourrait cependant être moins évident.

L'évaluation et la cartographie de l'isolement induit par l'inondation des routes s'est concentrée sur l'isolement des bâtiments résidentiels. Or, le cas d'étude présenté dans ce chapitre a montré que certaines infrastructures essentielles, comme des établissements scolaires, peuvent également être isolées par l'inondation. Il pourrait également s'agir de résidences pour aînés, d'établissements de santé, etc. Cet isolement peut entraîner des difficultés importantes à évacuer les nombreuses personnes se trouvant dans le bâtiment au moment de l'inondation. L'intervention de la sécurité civile pourrait alors être requise. Il serait donc particulièrement pertinent de tenir compte de l'isolement de ce type d'infrastructures essentielles, et d'intégrer cet aspect à la cartographie du risque.

Enfin, dans l'hypothèse où des données relatives aux réseaux d'électricité et aux réseaux d'eau potable deviendraient disponibles, des orientations méthodologiques menant à leur intégration à l'outil d'aide à la décision peuvent être proposées.

Une approche similaire à celle utilisée pour définir l'isolement induit par l'inondation du réseau routier peut être exploitée. Les réseaux électriques et d'eau potable peuvent en effet être transformés en « jeu de données réseaux » à l'aide de l'outil « Network Analyst » d'ArcGis. Chaque infrastructure essentielle fournissant de l'électricité ou de l'eau potable à la zone d'étude est définie comme « point de départ » du réseau, alors que les bâtiments résidentiels utilisant la ressource fournie par cette infrastructure sont définis comme « points d'arrivée ».

Afin de définir l'état de cette infrastructure (inondée/non inondée) et ainsi sa capacité à fournir une ressource, le polygone représentant l'infrastructure est converti en lignes. Si une de ces lignes intersecte un ou plusieurs pixels de la matrice des hauteurs d'eau, alors l'infrastructure est considérée comme non fonctionnelle. La génération d'une restriction linéaire ou d'une barrière sur le réseau est faite à l'aide d'une zone tampon de quelques dizaines de mètres, générée autour de l'infrastructure. On s'assure ainsi de l'existence d'une barrière sur le réseau, empêchant la génération d'un itinéraire entre l'infrastructure produisant la ressource et les bâtiments résidentiels qui l'utilisent. La génération d'un itinéraire permettra enfin d'identifier l'ensemble des bâtiments qui ne sont plus desservis par la ressource. Ces bâtiments peuvent aussi bien être situés en zone inondée qu'en zone sèche.

Nous avons souligné que l'absence totale d'eau potable est considérée comme critique pour la santé de la population après 48 h (section 6.1.3). L'impact de l'absence d'électricité est lui davantage considéré en termes de confort et de bien-être de la population. Ses conséquences se renforcent après 72 h en été et après 48 h en hiver.

Des niveaux de vulnérabilité induits par le manque de chacune de ces ressources, et intégrant cet aspect temporel, sont proposés au Tableau 7.6. Si les réseaux d'eau potable et d'électricité sont tous les deux indisponibles dans la zone étudiée, on suggère d'utiliser comme niveau de vulnérabilité induit par le manque de ressources essentielles, le plus haut niveau de vulnérabilité en cours pour les deux ressources.

Tableau 7.6: Niveaux de vulnérabilité associés au manque d'eau potable et d'électricité

	Niveaux de vulnérabilité	Description
Eau Potable	Faible	La ressource est fournie
	Sérieux	Manque de la ressource depuis moins de 48 h
	Très sévère	Manque de la ressource depuis plus de 48 h
Électricité	Faible	La ressource est fournie
	Sévère	Manque de la ressource depuis moins de 72 h en été et depuis moins de 48 h en hiver
	Sérieux	Manque de la ressource depuis plus de 72 h en été et depuis plus de 48 h en hiver

7.4 Sommaire

La pertinence des méthodes d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours a été illustrée à l'aide d'un scénario d'inondation réel, à savoir l'inondation de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, le 1^{er} mai 2011.

Les résultats des trois composantes de la vulnérabilité humaine ont tout d'abord été analysés et discutés. Les indicateurs de vulnérabilité socio-économique sélectionnés avec l'aide d'experts en sécurité civile et les poids qui leur ont été attribués à l'issue de leur comparaison par paire ont permis de bien identifier les personnes les plus sensibles aux impacts de l'inondation. Cependant, les seules données disponibles pour cette évaluation, à savoir les données de recensement de Statistique Canada, n'offrent des informations sur les caractéristiques de la population qu'à l'échelle de l'AD, regroupant de 400 à 700 personnes. Toutes les personnes résidant dans une même AD se voient donc attribuer un même niveau de vulnérabilité socio-économique, alors que celle-ci peut parfois varier de manière importante d'un foyer à un autre. De plus, ces données ne permettent pas d'établir le nombre de personnes par bâtiment, une information pourtant très importante pour l'organisation de l'intervention lors d'une inondation.

La méthode d'évaluation de l'exposition de la population à l'inondation en cours a également permis une évaluation précise de l'exposition à l'échelle du bâtiment. L'analyse des hauteurs d'eau a montré que celles-ci peuvent varier de manière importante d'un bâtiment à un autre, et cela même dans une zone caractérisée par de faibles dénivelés. Généraliser ces hauteurs d'eau à l'intérieur de larges zones peut donc induire un biais important dans l'évaluation de l'exposition de la population. Aussi, la connaissance des caractéristiques de chaque bâtiment est essentielle. Si les données de hauteurs d'eau sont indispensables à l'évaluation de l'exposition, ce sont les caractéristiques du bâtiment qui vont déterminer le niveau d'exposition de la population.

Les résultats obtenus sur la zone test ont également montré que la présence d'un bâtiment à l'intérieur de la zone inondée n'induit pas de manière systématique son inondation. Près du tiers des bâtiments localisés dans cette zone sont en effet considérés comme isolés, ce qui représente un nombre important d'individus devant être pris en compte dans la gestion de l'intervention. Cependant, l'outil géomatique utilisé pour identifier les bâtiments isolés génère un certain nombre d'erreurs, qu'il conviendrait de corriger.

Enfin, les résultats de l'évaluation du risque humain lié à l'inondation en cours le 1^{er} mai 2011 à Saint-Jean-sur-Richelieu ont montré que les composantes de la vulnérabilité influençant le niveau de risque varient parfois nettement d'un bâtiment à un autre. Ces variations seraient encore plus marquées si la vulnérabilité socio-économique était analysée à l'échelle du foyer et pas à celle de l'AD. Nos résultats soulignent l'importance d'analyser le niveau de risque à l'échelle du bâtiment et renforcent l'intérêt d'intégrer plusieurs composantes de la vulnérabilité à l'évaluation du risque, afin d'obtenir une analyse plus fine de celui-ci.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et du risque humain ont été intégrées à un outil d'aide à la décision, dont les caractéristiques et le potentiel d'utilisation en phase d'intervention ont été présentées et discutées. La limite principale de cet outil réside dans le temps nécessaire au regroupement des données indispensables à son exploitation, qui doivent dans certains cas être récoltées municipalité par municipalité, avant d'être prétraitées. Ces délais, parfois longs, ne sont pas compatibles avec les contraintes temporelles de la phase d'intervention. L'utilisation de l'outil devrait donc être anticipée dans les zones inondables. Enfin, certaines réserves ont été émises quant au fait que l'outil d'aide à la décision n'ait pas été développé à l'aide d'un logiciel à licence libre.

Finalement, des pistes ont été énoncées en vue de l'amélioration des méthodes. Il a été suggéré d'intégrer à l'évaluation de l'exposition de la population la présence de logements au

sous-sol des bâtiments résidentiels, ou encore la présence d'un étage supérieur au premier plancher, pouvant servir de refuge lors de l'inondation. L'isolement de certaines infrastructures essentielles, telles que les établissements d'enseignement, les résidences pour aînés, les hôpitaux, etc., pourrait également constituer une information pertinente pour l'organisation de la gestion de crise. Si des données relatives aux réseaux électriques et d'eau potable s'avéraient disponibles dans le futur, quelques orientations ont été données pour l'évaluation de l'impact du manque de ces deux ressources sur la vulnérabilité de la population lors de l'inondation.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

8.1 Résumé des contributions scientifiques

L'objectif principal de cette recherche doctorale pluridisciplinaire était de combler les limites actuelles des outils d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours en milieu urbain et rural, dont la finalité est de venir en soutien à la prise de décision lors de la phase d'intervention au cours d'une inondation. Afin d'atteindre cet objectif, trois volets, ayant chacun des contributions spécifiques, ont été considérés.

8.1.1 Première contribution : caractérisation spatiale d'une inondation en cours

Le premier volet avait pour objectif de combler les limites actuelles des méthodes de caractérisation spatiale d'une inondation en cours (étendues en milieu urbain et rural, ainsi que hauteurs d'eau en tout point des zones inondées), utilisant l'imagerie radar satellitaire.

Les capacités, déjà reconnues, de l'imagerie RSO de très haute résolution spatiale en bande C et en polarisation HH ont été exploitées pour la détection des zones inondées en eau libre. Afin de pallier aux limites de l'imagerie RSO pour la détection des zones inondées en milieu urbain, l'apport de données à caractère hydraulique, à savoir des données d'intervalles de récurrence d'inondation, a été introduit. L'hypothèse est que l'intervalle de récurrence d'inondation extrait des zones inondées en eau libre peut permettre d'identifier les zones urbaines et rurales touchées par l'inondation. Les limites de ces zones inondées peuvent ensuite être combinées à des données topographiques de haute précision pour estimer les hauteurs d'eau.

Trois étapes de développement méthodologique ont été considérées. La première était de développer une méthode permettant de délimiter les zones inondées en eau libre sur une image RSO de très haute résolution spatiale, acquise en bande C et en polarisation HH. La seconde était de valider la pertinence de l'intégration des données de récurrence d'inondation estimées en tout point de la zone inondable à une approche de cartographie des zones urbaines et rurales inondées. Enfin, la troisième étape consistait en le développement d'une approche

d'estimation des hauteurs d'eau dans les zones inondées exploitant la cartographie des zones inondées précédemment obtenue.

La méthode de délimitation des zones inondées en eau libre sur une image RSO est basée sur la classification orientée-objets. Les objets d'eau libre de l'image, générés par un algorithme de segmentation multi-résolution, sont tout d'abord identifiés à l'aide d'une approche de classification par logique floue, dont les paramètres sont extraits de la distribution statistique des rétrodiffusions de ces objets d'eau libre. Cette classification est ensuite raffinée à l'aide du degré d'appartenance des objets à la classe Eau libre et de leur intervalle maximal de récurrence d'inondation. Celui-ci est extrait de la carte raster des intervalles de récurrence d'inondation de la zone d'étude que nous avons générée. Les cellules de la carte des intervalles de récurrence d'inondation ayant une valeur inférieure ou égale à cet intervalle maximal sont intégrées à la cartographie. On considère ainsi qu'elles représentent l'ensemble des zones urbaines et rurales inondées au moment de l'acquisition de l'image RSO d'inondation.

Cette cartographie des zones urbaines et rurales inondées est exploitée pour estimer les hauteurs d'eau dans les zones inondées. Un MNT généré à partir de relevés LIDAR de très haute précision (15 cm) est utilisé pour extraire les élévations aux limites des zones inondées. L'interpolation par voisins naturels de ces valeurs permet d'obtenir les élévations de la surface d'eau dans les zones inondées. La soustraction des élévations du sol contenues dans le MNT à celles de la surface d'eau permet enfin d'obtenir les hauteurs d'eau en tout point des zones inondées.

Les approches de cartographie des zones urbaines et rurales inondées ont été testées à l'aide de deux images RADARSAT-2 (bande C), l'une en mode Ultra-Fin et l'autre en mode Fin, acquises en mai 2011 au cours de l'inondation de la rivière Richelieu (Québec). La classification initiale des zones inondées en eau libre a montré des résultats mitigés. Si 88% des pixels d'eau libre ont été correctement identifiés sur l'image en mode Fin, avec un taux d'erreur de commission de 10%, ils ne sont que 65% sur l'image en mode Ultra-Fin, avec un taux d'erreur de commission de 30%. La présence de vent sur les plans d'eau et de végétation en bordure des champs inondés, et dans une moindre mesure les imprécisions de la méthode de segmentation multi-résolution utilisée, génèrent en effet des erreurs d'omission importantes, qui ne peuvent être réduites à l'aide de l'approche proposée. Ces erreurs sont plus importantes sur l'image en mode Ultra-Fin à cause de son plus faible angle d'incidence (23°), qui est sensible à la rugosité de l'eau due à l'action du vent, particulièrement présent au moment de l'acquisition de l'image. La présence de nombreuses surfaces urbaines artificielles ayant une rétrodiffusion

de type spéculaire engendre également des erreurs de commissions. C'est le cas en particulier sur l'image en mode Ultra-Fin, dont la très haute résolution spatiale (3 m) permet à ce type de surfaces d'être isolé dans des objets lors de la segmentation multi-résolution.

L'étape de raffinement de la classification initiale de l'eau libre à l'aide des degrés d'appartenance des objets à la classe Eau libre et de leur intervalle de récurrence maximal d'inondation a cependant montré son efficacité. Les degrés d'appartenance des objets à la classe Eau libre ont permis de réduire les erreurs de commission à 18% pour l'image en mode Ultra-Fin et à 5% pour l'image en mode Fin. L'utilisation des intervalles de récurrence d'inondation des objets d'eau libre a par la suite montré sa pertinence pour cette étape de raffinement, puisque les erreurs de commission ont été réduites de manière très significative, jusqu'à des taux de 1% (mode Ultra-Fin) et de 2% (mode Fin).

Enfin, les résultats finaux de la cartographie des zones urbaines et rurales inondées sont particulièrement satisfaisants, avec des taux de 86% (mode Ultra-Fin) et de 87% (mode Fin) de pixels correctement identifiés en zone urbaine et de 96% (mode Ultra-Fin) et 97% (mode Fin) en zone rurale, pour les deux cas d'étude. Ces résultats illustrent l'intérêt d'intégrer des données d'intervalles de récurrence d'inondation à une approche de cartographie des zones urbaines et rurales inondées par télédétection RSO. Ils sont de plus supérieurs à ceux obtenus dans des études aux objectifs similaires. A notre connaissance, les résultats les plus précis ont en effet été obtenus par Mason *et al.* (2012), à l'aide d'un algorithme permettant de détecter 89% des pixels inondés en milieu rural et 75% en milieu urbain, sur une image TerraSAR-X. Les taux d'erreurs de commission associés sont de 6% en milieu rural et de 24% en milieu urbain. Guistarini *et al.* (2013) ont présenté une approche permettant d'identifier 81,8% des pixels inondés en milieu urbain sur une image TerraSAR-X, avec un taux d'erreurs de commission limité à 2,6%.

Finalement, les hauteurs d'eau estimées dans les zones inondées, générées à partir de l'image RS-2 en mode Ultra-Fin, ont montré une précision satisfaisante. Les valeurs estimées présentent en effet un RMSE de 8 cm et une erreur moyenne de 5 cm, lorsque comparées aux données de validation disponibles.

L'utilisation opérationnelle des méthodes présentées lors d'une phase d'intervention apparaît être possible. D'une part, les données à caractère hydraulique et les données topographiques de haute précision semblent être disponibles pour un grand nombre de rivières soumises au risque d'inondation. D'autre part, les temps de traitement de ces méthodes en mode opérationnel sont courts, et sont ainsi compatibles avec les exigences de la gestion de crise.

Les traitements en mode pré-opérationnel sont plus longs, mais peuvent être réalisés en avance pour les zones où le risque d'inondation est avéré. Cependant, et si la méthode d'estimation des hauteurs d'eau est déjà entièrement automatisée, certains aspects de la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées empêchent actuellement son automatisation.

Ainsi, et malgré certaines limites, les résultats présentés illustrent la capacité des approches proposées à déterminer avec une précision satisfaisante l'étendue des zones inondées ainsi que les hauteurs d'eau en tout point de ces zones. L'utilisation combinée de données RSO et de données d'intervalles de récurrence d'inondation, qui n'avaient jusque-là jamais été exploitées pour la détection des zones urbaines et rurales inondées, a de plus montré sa pertinence. C'est là le principal aspect innovant de l'approche proposée. L'objectif du premier volet de cette recherche doctorale a été atteint. Ces travaux ont fait l'objet d'un article qui a été soumis à la revue *Remote Sensing of Environment* au début de l'année 2016. Suite aux commentaires reçus, cet article est en cours de correction.

8.1.2 Deuxième contribution: évaluation et cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours

Le second volet de cette recherche doctorale avait pour objectif de combler les limites actuelles des méthodes d'évaluation, puis de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain à une inondation en cours, à l'échelle du bâtiment.

La prise en compte de trois composantes de la vulnérabilité, à savoir 1) la vulnérabilité sociale et économique, 2) la vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles et 3) l'exposition de la population à l'échelle du bâtiment, a été proposée. Chacune de ces composantes doit être caractérisée à l'aide d'indicateurs spécifiques adaptés aux caractéristiques de l'environnement auquel l'outil s'adresse, et doit ensuite être intégrée à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité humaine. L'identification des indicateurs relatifs à chacune de ces composantes et leur intégration à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité humaine ont ainsi fait l'objet d'étapes spécifiques. La dernière étape consistait en l'intégration de l'ensemble de ces composantes de la vulnérabilité humaine et des caractéristiques de l'aléa en cours en une seule et même méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours, à l'échelle du bâtiment.

Pour ce faire, des experts en sécurité civile ayant l'expérience de la gestion de l'intervention au cours d'une inondation ont été consultés. Cette consultation a abouti à la sélection d'un ensemble de six indicateurs de vulnérabilité socio-économique, pouvant être exploités dans un contexte social et économique similaire à celui du Québec. Ces indicateurs ont été intégrés à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique basée sur une approche d'analyse multicritère hiérarchique, permettant d'intégrer aisément l'avis d'experts au processus d'évaluation. Les résultats obtenus sont classifiés puis cartographiés par bâtiment selon trois niveaux de vulnérabilité, à savoir « Sérieux », « Sévère » et « Très Sévère ». Cette méthode exploite des informations issues du recensement de la population, disponibles par aire de diffusion.

L'exposition de la population à une inondation en cours est réalisée en définissant les parties du bâtiment atteintes par l'eau, à savoir le sous-sol et le premier plancher. Les experts interrogés considèrent en effet que c'est la simple présence d'eau dans ces parties du bâtiment qui engendre différents niveaux d'exposition, et pas la hauteur d'eau qui s'y trouve. L'exposition de la population est ainsi considérée comme « Faible » quand le bâtiment n'est pas inondé, comme « Sévère » quand le sous-sol du bâtiment est inondé et enfin comme « Très Sévère » quand le premier plancher est inondé. Afin de définir le niveau d'exposition de la population à l'échelle du bâtiment, les caractéristiques de chaque bâtiment résidentiel, ainsi que les données de hauteur d'eau issues de l'approche présentée dans le premier volet de ces travaux, sont exploitées.

Enfin, l'absence de trois ressources essentielles a été identifiée comme ayant une influence sur la vulnérabilité de la population au cours de l'inondation. Il s'agit du réseau routier, dont l'inondation entraîne l'isolement de la population, du réseau d'électricité et enfin du réseau d'eau potable. Les experts ont cependant souligné que l'absence de ces deux dernières ressources ne constitue pas une raison d'évacuer le logement, le manque d'électricité ayant principalement des effets sur le bien-être de la population et le manque d'eau potable étant généralement comblé par des mesures de distribution gérées par la municipalité. Les données relatives aux réseaux d'électricité et aux réseaux d'eau potable n'étant pas disponibles, ces données étant considérées comme « sensibles », seul l'isolement induit par l'inondation du réseau routier a été intégré à la méthode proposée. Un bâtiment non inondé mais isolé conserve un niveau de vulnérabilité « Faible », mais ce niveau devient « Sévère » lorsque le bâtiment est isolé. L'identification des bâtiments isolés par l'inondation exploite les données relatives au réseau routier, ainsi que les données de hauteurs d'eau déjà présentées.

Finalement, le niveau de risque humain lié à une inondation en cours est défini au moyen du plus fort niveau de vulnérabilité de l'ensemble des composantes de la vulnérabilité humaine intégrées à la méthode, et est cartographié à l'échelle du bâtiment. Utiliser le plus fort niveau de vulnérabilité pour quantifier le niveau de risque permet de considérer les conséquences les plus importantes de l'inondation sur la population, et ainsi de ne pas minimiser l'ampleur des interventions à mener.

Une attention particulière a été portée à la disponibilité et à la qualité des données nécessaires à l'intégration des différents indicateurs de vulnérabilité à l'approche proposée. Des données dont la disponibilité est généralement assurée auprès de services municipaux ou gouvernementaux ont ainsi été privilégiées. La non-disponibilité de certaines données a été anticipée, et des solutions alternatives ont été proposées.

Ainsi, l'objectif principal du second volet de ces travaux a été atteint. Un premier aspect innovant de l'approche proposée est l'intégration de ces trois composantes de la vulnérabilité humaine, validée par les experts interrogés, à une méthode d'évaluation du risque humain à une inondation en cours. Une seconde innovation est l'intégration de données de hauteurs d'eau issues d'une image RSO acquise au cours d'une inondation à une approche d'évaluation du risque. Cet aspect mérite en effet d'être souligné, puisque les approches orientées vers la phase d'intervention utilisent fréquemment les données issues de la modélisation hydraulique. Les différents aspects de ce second volet feront prochainement l'objet d'un article scientifique

8.1.3 Troisième contribution : l'outil d'aide à la décision

Enfin, le troisième et dernier volet de ces travaux avait pour objectif de démontrer la pertinence de la méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours comme outil d'aide à la décision. La première étape de ce dernier volet consistait ainsi en l'application de la méthode proposée à un scénario d'inondation réel. La seconde étape était d'identifier les avantages et les limites de l'outil développé dans le cadre d'une utilisation opérationnelle lors de la phase d'intervention.

La méthode proposée a ainsi été appliquée à une zone à forte dominante résidentielle fortement touchée par l'inondation de la rivière Richelieu, en 2011. Les résultats de chaque composante de la vulnérabilité ont été analysés et discutés. Les indicateurs de vulnérabilité socio-économique sélectionnés avec l'aide des experts, et la méthode les intégrant, permettent de bien identifier les personnes les plus sensibles aux impacts de l'inondation. Les résultats de la

méthode d'évaluation de l'exposition de la population à l'inondation en cours ont également montré la pertinence d'évaluer l'exposition à l'échelle du bâtiment. Les différences parfois importantes des hauteurs d'eau, et cela même dans une zone caractérisée par de faibles dénivelés, mais aussi et surtout les caractéristiques de chaque bâtiment, font en effet varier de manière importante l'exposition de la population. Enfin, le nombre important de bâtiments non inondés mais isolés par l'inondation présents dans la zone test a confirmé l'importance de tenir compte de cet aspect dans l'outil d'aide à la décision. Il est cependant apparu que des améliorations de la méthode permettant l'identification des bâtiments isolés sont nécessaires, pour permettre une identification plus précise de ces bâtiments.

L'outil d'aide à la décision développé permet d'obtenir une cartographie détaillée et aisément interprétable du niveau de risque à l'échelle du bâtiment. L'ensemble des informations liées à cette cartographie et à ses composantes sont également fournies sous forme tabulaire. Afin de rendre l'outil développé facilement utilisable, les traitements ont été automatisés et une suite d'outils a été créée pour guider pas à pas la génération des résultats. Une des limites principales de cet outil réside à notre sens dans les temps nécessaires au regroupement et à la préparation des données nécessaires à son exploitation. Le fait que l'outil ne soit actuellement pas implémenté dans un logiciel à licence libre peut également constituer un frein à son utilisation par des services de sécurité civile.

Finalement, la pertinence de la méthode d'évaluation et de cartographie du risque humain lié à une inondation en cours développée dans le cadre de cette thèse a été illustrée. Si un certain nombre d'améliorations doivent encore lui être apportées, l'outil développé peut cependant être exploité dans son état actuel. Ainsi, l'objectif de ce troisième volet a été atteint.

8.2 Perspectives de recherche

Diverses améliorations et perspectives de recherche peuvent être identifiées à l'issue de ces travaux.

Tout d'abord, il est important de rappeler que la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées n'a pour le moment été appliquée qu'à un seul scénario d'inondation, présentant une structure urbaine simple, mais aussi des limites de zones inondées clairement visibles, car situées au milieu de champs dépourvus de végétation. De plus, il n'a pas été possible d'analyser l'impact de la présence de neige humide sur la précision de la classification.

La neige humide, qui peut être fréquente lors des inondations printanières dans les régions nordiques comme le Québec, a en effet une rétrodiffusion de type spéculaire et peut ainsi être confondue avec de l'eau libre. Il apparaît ainsi nécessaire d'appliquer la méthode de cartographie de l'aléa inondation à d'autres scénarios d'inondation, présentant des caractéristiques spatiales et des conditions au sol différentes. Cela permettrait de valider la robustesse de l'approche proposée, mais également, le cas échéant, de lui apporter les améliorations nécessaires.

De la même manière, en l'absence de relevés de hauteurs d'eau réalisés au cours de l'inondation, les données utilisées pour le test de la méthode d'estimation des hauteurs d'eau ont dû être produites à l'aide d'une méthode identique à celle utilisée pour l'estimation des hauteurs d'eau. La méthode n'a de plus été appliquée qu'à une zone test peu étendue. Il pourrait donc être pertinent de valider cette méthode à l'aide d'autres scénarios d'inondation, pour lesquels des relevés de hauteurs d'eau dans les zones touchées sont disponibles.

Tester cette approche à l'aide d'images RSO acquises dans d'autres fréquences radar pourrait également s'avérer intéressant. A titre d'exemple, les travaux présentés par Guistarini *et al.* (2013) ont montré qu'il est possible d'identifier de manière satisfaisante l'eau libre sur une image TerraSAR-X (bande X), à l'aide d'une approche dont on s'est inspiré, et qui combine la calibration de la distribution statistique des rétrodiffusions de l'eau libre et le seuillage. Si les résultats obtenus s'avèrent satisfaisants, cela pourrait permettre de ne pas être dépendant du passage d'un satellite opérant en bande C (bien que les RSO des Sentinelles 1A et 1B et de la future Constellation RADARSAT vont accentuer la disponibilité de ces données à compter de 2018 ou 2019) sur la zone inondée pour obtenir des images d'inondation pouvant être exploitées dans cette méthode.

Il a également été souligné que dans son état actuel, la méthode de cartographie des zones urbaines et rurales inondées ne peut être automatisée, ce qui constitue un frein important à son utilisation en phase d'intervention. L'algorithme de segmentation multi-résolution utilisé dans l'approche de classification orientée-objets n'est en effet disponible qu'avec le logiciel eCognition, dont la licence n'est pas libre. Il conviendrait donc de rechercher une solution alternative à l'utilisation de cet algorithme, produisant une segmentation précise de l'image en objets, et pouvant être intégrée à une chaîne de traitement automatisée.

Des pistes d'amélioration des méthodes d'évaluation des différentes composantes de la vulnérabilité ont également été énoncées. Nous suggérons d'intégrer la présence de logements au sous-sol des bâtiments résidentiels à l'évaluation de l'exposition de la population, ainsi que la

présence d'un étage supérieur au premier plancher, pouvant servir de refuge à la population. Il a également été souligné que l'isolement de certaines infrastructures essentielles pourrait être une information importante pour l'organisation de la gestion de crise. Ces améliorations devraient être discutées avec des experts en sécurité civile, puis être intégrées, si elles sont pertinentes, à l'outil développé à l'aide de données adaptées. Enfin, l'utilisation d'une méthode non dépendante du logiciel ArcGis pour l'identification des bâtiments isolés, et plus largement le transfert de l'outil développé dans un logiciel à licence libre, pourraient être examinés dans le futur selon les besoins.

Les travaux qui ont été menés dans le cadre de cette recherche doctorale, et la méthode qui en découle, ont pour vocation d'être intégrés à un outil de Gestion et d'Analyse du Risque d'Inondation (GARI). La méthode développée doit constituer le mode d'analyse en temps réel de cet outil, permettant d'évaluer l'état de la situation d'inondation en cours, le niveau de risque humain qui en découle et ainsi les besoins liés à cette situation. Cet outil comprend également un mode prévisionnel, qui permet d'évaluer le risque lié à une inondation prévue ou future, à partir d'estimations de niveaux d'eau et de débits réalisées à une station hydrométrique. GARI est pour le moment appliqué au système transfrontalier du lac Champlain et de la rivière Richelieu, mais se donne pour objectif de devenir un outil standardisé d'aide à la décision pour la gestion des risques liés aux inondations (en prévention, préparation, intervention et rétablissement), à destination des services de sécurité civile provinciaux et fédéraux. Le ministère de la Sécurité Publique du Québec est ainsi partenaire de ce projet GARI (2015-2018), qui est financé par le Centre des sciences pour la Sécurité (CSS) de Recherche et Développement pour la Défense Canada (RDDC), dans le cadre de son Programme Canadien pour la Sûreté et la Sécurité (PCSS).

RÉFÉRENCES

- Aboelata M, Bowles DS & McClelland DM (2003) GIS model for estimating dam failure life loss. *Risk-based decisionmaking in water resources X*. Haimes YY & Moser DA (Édit.). p 126-145.
- Adam S, Wiebe J, Collins M & Pietroniro A (1998) Radarsat flood mapping in the Peace-Athabasca delta, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing* 24(1):69-79.
- Adger WN (2000) Social and ecological resilience: are they related? *Progress in Human Geography* 24(3):347-364.
- Adger WN (2006) Vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3):268-281.
- Adger WN, Agrawala S, Mirza MMQ, Conde C, O'Brien K, Pulhin J, Pulwarty RS, Smit B & Takahashi K (2007) Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry ML, Palutikof JP, Van Der Linden PJ and Hanson CE (Édit.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, p 717-743.
- Adger WN, Brooks N, Bentham G, Agnew M & Eriksen S (2004) New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Tyndall Centre for Climate Change Research, Technical Report 7, Norwich, UK, 128 p.
- Agence Spatiale Canadienne (2015) *Caractéristiques des satellites RADARSAT*. <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/radarsat/radarsat-tableau.asp> (Consulté le 16 Août 2015)
- Ahtonen P & Hallikainen M (2005) Automatic detection of water bodies from spaceborne SAR images. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005 (Séoul, Corée du Nord, 25-29 juillet 2005)*. p 3845-3848.
- Altman NS (1992) An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression. *The American Statistician* 46(3):175-185.
- Alwang J, Siegel PB & Jorgensen SL (2001) Vulnerability: a view from different disciplines. Human Development Network, the World Bank, Washington, DC, USA. 46 p
- Amberg V (2005) *Analyse de scènes péri-urbaines à partir d'images radar haute résolution. Application à l'extraction semi-automatique du réseau routier*. Thèse de doctorat (Institut National Polytechnique de Toulouse, France). 153 p
- André G, Guillaude R & Bahoken F (2002) Flood mapping using spatial radar and optical imagery and digital elevation model: Limits and capacities. *Houille Blanche - Revue Internationale de l'eau* (1):49-54.
- Andreoli R & Yesou H (2007) Large scale change detection techniques dedicated to flood monitoring using ENVISAT wide swath mode data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (Barcelone, Espagne, 23-27 juillet 2007)*. p 2382-2385.

- Arab-Sedze M (2013) *Complémentarité des systèmes radar en bande L et LIDAR pour l'étude des terrains volcaniques: cas du Piton de la Fournaise*. Thèse de doctorat (Institut de Physique du Globe de Paris, France). 226 p
- ArcGis Pro (2015) *Comparaison des méthodes d'interpolation*. <http://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/comparing-interpolation-methods.htm> (Consulté le 15 mars 2015)
- Armaş I & Gavriş A (2013) Social vulnerability assessment using spatial multi-criteria analysis (SEVI model) and the Social Vulnerability Index (SoVI model) – a case study for Bucharest, Romania. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13(6):1481-1499.
- Arnell NW & Lloyd-Hughes B (2014) The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Climatic Change* 122(1):127-140.
- Aubrecht C, Freire S, Neuhold C, Curtis A & Steinnocher K (2012) Introducing a temporal component in spatial vulnerability analysis. *Disaster Advances* 5(2):7.
- Baatz M & Schäpe A (1999) Object based and multi-scale analysis in semantic networks. *Proceeding of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing (Enschede, Pays-Bas, 16-20 août 1999)*.
- Badji M & Dautrebande S (1997) Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soil using ERS-1 SAR imagery. *Hydrol. Process.* 11(10):1441-1450.
- Baghdadi N, Bernier M, Gauthier R & Neeson I (2001) Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing* 22(1):71-88.
- Baghdadi N, Holah N & Zribi M (2006) Soil moisture estimation using multiincidence and multi-polarization ASAR SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 7(10):1907-1920.
- Baghdadi N, King C, Bourguignon A & Remond A (2002) Potential of ERS and Radarsat data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields: Application to catchments in Northern France. *International Journal of Remote Sensing* 23(17):3427-3442.
- Balica SF, Douben N & Wright NG (2009) Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology* 60(10):2571-2580.
- Bandana K & Hodgson ME (2008) A GIS-based model to determine site suitability of emergency evacuation shelters. *Transactions in GIS* 12(2):227-248.
- Barczak A & Grivault C (2007) *Système d'Information Géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain. NOVATECH 2007* (Lyon, France), Graie (Édit.), p 139-146.
- Barroca B, Pottier N & Lefort E (2005) Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval. *Septième Rencontres de Théo Quant.* (Besançon, France). 12 p.

- Bartsch A, Pathe C, Wagner W & Scipal K (2008) Detection of permanent open water surfaces in central Siberia with ENVISAT ASAR wide swath data with special emphasis on the estimation of methane fluxes from tundra wetlands. *Hydrology Research* 39(2):89-100.
- Bates PD, Wilson MD, Horritt MS, Mason DC, Holden N & Currie A (2006) Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modelling. *Journal of Hydrology* 328(1–2):306-318.
- Becerra S (2012) Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]* 12(1).
- Beltaos S (Édit.) (1995) *River ice jams*. Water Resources Publication, LCC, Highlands Ranch, CO, USA. 372 p.
- Benz UC, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I & Heynen M (2004) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(3–4):239-258.
- Bergeron T (2011) *Estimation de la ressource éolienne en mer à l'aide du satellite RADARSAT-2*. Thèse de maîtrise (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada). 126 p.
- Birkmann J (2006) Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. *Measuring Vulnerability To Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies* Birkmann J (Édit.) United Nations University Press, Seconde Edition. p 9-54.
- Birkmann J (2007) Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards* 7(1):20-31.
- Birkmann J, Cardona OD, Carreño ML, Barbat AH, Pelling M, Schneiderbauer S, Kienberger S, Keiler M, Alexander D, Zeil P & Welle T (2013) Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Nat Hazards* 67(2):193-211.
- Blaikie P, Cannon T, Davis I & Wisner B (1994) *At Risk: Natural Hazards, Peoples' Vulnerability and Disasters*. Routledge (Édit.), London, UK. 134 p.
- Blaschke T (2010) Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(1):2-16.
- Blaschke T, Hay GJ, Kelly M, Lang S, Hofmann P, Addink E, Queiroz Feitosa R, van der Meer F, van der Werff H, van Coillie F & Tiede D (2014) Geographic object-based image analysis – towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87(100):180-191.
- Blin P, Leclerc M, Secretan Y & Morse B (2005) Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(4):427-451.

- Bogardi JJ & Birkmann J (2004) Vulnerability assessment : the first step towards sustainable risk reduction. *Disasters and society : from hazard assessment to risk reduction*, Malzahn D. and Tina, P. (Édit.), Logos Verlag Berlin, Allemagne. p 75-82.
- Boni G, Candela L, Castelli F, Dellepiane S, Palandri M, Persi D, Pierdicca N, Rudari R, Serpico S, Siccardi F & Versace C (2009) The OPERA project: EO-based flood risk management in Italy. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009 (Cape Town, Afrique du Sud, 12-17 juillet 2009)*. p II-929-II-932.
- Boni G, Castelli F, Ferraris L, Pierdicca N, Serpico S & Siccardi F (2007) High resolution COSMO/SkyMed SAR data analysis for civil protection from flooding events. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (Barcelone, Espagne, 23-27 juillet 2007)*. p 6-9.
- Bonn F & Dixon R (2005) Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with RADARSAT-1 data. *Nat Hazards* 35(3):377-393.
- Bonn F & Rochon G (1996) *Précis de télédétection: Principes et méthodes*. Presses de l'Université du Québec (Édit.). 485 p.
- Bonnet S, Toromanoff F, Bauwens S, Michez A, Dedry L & Lejeune P (2013) Principes de base de la télédétection et ses potentialités comme outil de caractérisation de la ressource forestière. Partie 2 -Le LIDAR aérien. *Forêt Wallonne* 124:28-41.
- Bonnifait L (2005) *Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois*. Thèse de maîtrise (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada). 76 p.
- Borruff CJ, Emrich CT & Cutter SL (2005) Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *Journal of Coastal Research* doi:10.2112/04-0172.1:932-942.
- Bourgeau-Chavez LL, Kasischke ES & Smith K (1997) Using satellite radar imagery to monitor flood conditions in wetland ecosystems of southern Florida. *SPIE 2009 (Taormina, Italie - septembre 2009)*. p 139-148.
- Bouvet A (2009) *Radar remote sensing applied to rice fields monitoring. Methods using a backscatter intensity ratio*. Thèse de doctorat (Université Paul Sabatier, Toulouse, France). 186 p.
- Brakenridge GR, Tracy BT & Knox JC (1998) Orbital SAR remote sensing of a river flood wave. *International Journal of Remote Sensing* 19(7):1439-1445.
- Brisco B, Schmitt A, Murnaghan K, Kaya S & Roth A (2013) SAR polarimetric change detection for flooded vegetation. *International Journal of Digital Earth* 6(2):103-114.
- Brisco B, Touzi R, van der Sanden JJ, Charbonneau F, Pultz TJ & D'Iorio M (2008) Water resource applications with RADARSAT-2 – a preview. *International Journal of Digital Earth* 1(1):130-147.
- Brivio PA, Colombo R, Maggi M & Tomasoni R (2002) Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *International Journal of Remote Sensing* 23(3):429-441.

- Brooks N (2003) Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. in *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, University of East Anglia, Norwich, UK, p 1-16.
- Brooks N, Neil Adger W & Mick Kelly P (2005) The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change* 15(2):151-163.
- Buck CH & Monni S (2000) Application of SAR Interferometry to Flood Damage Assessment. *SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites (Toulouse, France, 26-29 octobre 1999)*. p 473.
- Buckle P, Graham M & Smale S (2001) Assessment of Personal & Community Resilience & Vulnerability. Report: EMA Project 2001, vol.15, 50 p.
- Caloz R & Collet C (2001) *Précis de télédétection, Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec (Édit.). 398 p.
- Cannon T (2000) Vulnerability analysis and disasters. in *Floods*, Parker, DJ. (Édit.) Routledge, London, Vol 1. p 45-55.
- Cardona OD (1999) *Environmental Management and Disaster Prevention: Two Related Topics: A Holistic Risk Assessment and Management Approach*, in *Natural Disaster Management*, Ingleton, J. (Édit), Tudor Rose, London, UK.
- Cardona OD (2005) Indicators of Disaster Risk and Risk Management: Program for Latin America and the Caribbean- Summary Report. Inter-American Development Bank, Washington, États-Unis, p 43.
- Cardona OD, van Aalst MK, Birkmann J, Fordman M, McGregor G, Perez R, Pulwarty RS, Schipper ELF & Sinh BT (2012) Determinants of risk: exposure and vulnerability. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Field CB, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Édit.) Cambridge University Press, Cambridge, UK. p 65-108.
- Carreño ML, Cardona OD & Barbat AH (2007) Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Nat Hazards* 40(1):137-172.
- Carrier MA, Lefebvre R, Rivard C, Parent M, Ballard JM, Benoît N, Vigneault H, Beaudry C, Malet X, Laurencelle M, Gosselin JS, Ladevèze P, Thériault R, Beaudin I, Michaud A, Pugin A, Crow H, Gloagen E, Bleser J, Martin A & Lavoie D (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada), p 31-33.
- Centre d'Expertise Hydrique du Québec (2006) Révision des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans, Rivières Richelieu, Rivière du Sud et Baie Missisquoi, (Gouvernement du Québec).100 p.
- Centre d'Expertise Hydrique du Québec (2015) *Carte interactive des rapports et des cartes de zones inondables produits originellement par le gouvernement du Québec*,

- (Gouvernement du Québec), <https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/rapports-carto.htm> (Consulté le 10 Novembre 2015).
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2015) The Human Cost of Natural Disasters. A Global Perspective. CRED (Édit), p 9-17.
- Chaire en Hydrologie Statistique (2002) HYFRAN, logiciel pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, version 1.1. (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada). 72 p.
- Chakraborty J, Tobin GA & Montz BE (2005) Population Evacuation: Assessing Spatial Variability in Geophysical Risk and Social Vulnerability to Natural Hazards. *Natural Hazards Review* 6(1):23-33.
- Chang L & Lindell MK (2005) Hurricane wind risk assessment for Miami-Dade County, Florida: a consequence-based engineering (CBE) methodology. Mid-America Earthquake Center (Édit.), University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, États-Unis.
- Chang SE, Yip JZK, van Zijll de Jong SL, Chaster R & Lowcock A (2015) Using vulnerability indicators to develop resilience networks: a similarity approach. *Nat Hazards* 78(3):1827-1841.
- Cherqui F (2005) *Methodology for assessing sustainable urban district project - ADEQUA method*. Thèse de doctorat (Université de La Rochelle, France). 203 p.
- Chini M, Pulvirenti L & Pierdicca N (2012) Analysis and Interpretation of the COSMO-SkyMed Observations of the 2011 Japan Tsunami. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 9(3):467-471.
- Chini M, Pulvirenti L, Pierdicca N & Guerriero L (2011) Multi-temporal segmentation of Cosmo-SkyMed SAR data for flood monitoring. *IEEE GRSS and ISPRS Joint Urban Remote Sensing Event (Munich, Allemagne, 11-13 avril 2011)*. p 281-284.
- Ciurean RL, Schröter D & Glade T (2013) Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction. *Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters*, Tiefenbacher J (Édit.). p 1-32.
- Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (2010) *Présentation du territoire, organisme de bassin versant Richelieu/Saint Laurent*. <http://www.covabar.qc.ca/territoire.html> (Consulté le 1er mars 2013)
- Connor R & Hiroki K (2005) Development of a method for assessing flood vulnerability. *Water science and technology* 51(5):61-67.
- Cossu R, Schoepfer E, Bally P & Fusco L (2009) Near real-time SAR-based processing to support flood monitoring. *Journal of Real-Time Image Processing* 4(3):205-218.
- Cova TJ & Johnson JP (2003) A network flow model for lane-based evacuation routing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37(7):579-604.
- Cutter SL (1996) Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography* 20(4):529-539.

- Cutter SL, Barnes L, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E & Webb J (2008) A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change* 18(4):598-606.
- Cutter SL, Boruff B & Shirley W (2003) Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly* 84(2):242-261.
- Cutter SL & Emrich CT (2006) Moral hazard, social catastrophe: the changing face of vulnerability along the hurricane coasts. *Ann. Am. Acad. Pol. Soc. Sci.* 604(1):102-112.
- Cutter SL, Emrich CT, Morath DP & Dunning CM (2013) Integrating social vulnerability into federal flood risk management planning. *Journal of Flood Risk Management* 6(4):332-344.
- Cutter SL, Emrich CT, Webb JJ & Morath D (2009) Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 44 p.
- Cutter SL, Mitchell JT & Scott MS (2000) Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers* 90(4):713-737.
- D'Ercole R & Metzger P (2009) La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergéo* 447.
- Dabiri Z, Hölbling D, Lang S & Bartsch A (2015) Applicability of multi-seasonal X-band SAR imagery for multiresolution segmentation: a case study in a riparian mixed forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-1/W5:123-128.
- Dauphiné A & Provitolo D (2007) La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie* 654(2):115-125.
- De Groeve T (2010) Flood monitoring and mapping using passive microwave remote sensing in Namibia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 1(1):19-35.
- De Lange HJ, Sala S, Vighi M & Faber JH (2010) Ecological vulnerability in risk assessment- A review and perspectives. *Science of The Total Environment* 408(18):3871-3879.
- De Roo A, Van Der Knijff J, Horritt M, Schmuck G & De Jong S (1999) Assessing flood damages of the 1997 Oder flood and the 1995 Meuse flood. *2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*. (Enschede, Pays-Bas, 16-20 août 1999).
- Definiens AG (2011) eCognition Definiens Developer 8.7 User Guide (Version 8.7), p 156-158.
- DeKay ML & McClelland GH (1993) Predicting Loss of Life in Cases of Dam Failure and Flash Flood. *Risk Analysis* 13(2):193-205.
- Dellepiane S & Angiati E (2012) A New Method for Cross-Normalization and Multitemporal Visualization of SAR Images for the Detection of Flooded Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(7):2765-2779.

- Dellepiane S, Angiati E & Vernazza G (2010) Processing and segmentation of COSMO-SkyMed images for flood monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (Honolulu, Hawaï, États-Unis, 25-30 juillet 2010)*. p 4807-4810.
- Dellepiane S, Bo G, Monni S & Buck C (2000) SAR images and interferometric coherence for flood monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (Honolulu, Hawaï, États-Unis, 24-28 juillet 2000)*. p 2608-2610.
- Dewals BJ, Detrembleur S, Archambeau P, Ercicum S, Ernst J & Piroton M (2011) Caractérisation micro-échelle du risque d'inondation : modélisation hydraulique détaillée et quantification des impacts socio-économiques. *La Houille Blanche* (2):28-34.
- Dewan AM (2013) Hazards, Risk, and Vulnerability. *Floods in a Megacity*, Springer Geography. p 35-74.
- Dewan AM, Kankam-Yeboah K & Nishigaki M (2006) Using Synthetic Aperture Radar (SAR) Data for Mapping River Water Flooding in an Urban Landscape: A Case Study of Greater Dhaka, Bangladesh. *Journal of Japan society of hydrology and water resources* 19(1):44-54.
- Di Baldassarre G, Schumann G & Bates PD (2009) A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. *Journal of Hydrology* 367(3-4):276-282.
- Di Baldassarre G, Schumann G, Brandimarte L & Bates P (2011) Timely Low Resolution SAR Imagery To Support Floodplain Modelling: a Case Study Review. *Surv Geophys* 32(3):255-269.
- Digital Globe (2013) *IKONOS design and specifications*. https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/96/DG_IKONOS_DS.pdf (Consulté le 15 mars 2014)
- Digital Globe (2014) *GeoEye-1 design and specifications*. https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/97/DG_GeoEye1.pdf (Consulté le 15 mars 2014)
- Doocy S, Daniels A, Murray S & Kirsch TD (2013) The Human Impact of Floods: a Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review. *PLoS Currents* 5.
- Dubé-Loubert H, Parent M & A. B (2014) Cartographie des dépôts de surface des bassins versants contigus des rivières Richelieu, Yamaska et de la baie Missisquoi (Ministère des Ressources Naturelles du Québec), p 7.
- Earth Observation Portal Directory (2016) *TanDEM-X: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x> (Consulté le 14 Janvier 2016)
- Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR & Mearns LO (2000) Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science* 289(5487):2068-2074.
- Eltoft T (2005) The Rician inverse Gaussian distribution: a new model for non-Rayleigh signal amplitude statistics. *IEEE Transactions on Image Processing* 14(11):1722-1735.

- Environnement Canada (2015) *Données quotidiennes sur le débit et le niveau d'eau pour la rivière Richelieu, station Rapides Fryers (02OJ007)*. (Gouvernement du Canada) http://wateroffice.ec.gc.ca/search/searchResult_f.html (Consulté le 2 mars 2015)
- Evans TL, Costa M, Telmer K & Silva TSF (2010) Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 3(4 PART 2):560-575.
- Evans TL, Costa M, Tomas WM & Camilo AR (2014) Large-scale habitat mapping of the Brazilian Pantanal wetland: A synthetic aperture radar approach. *Remote Sensing of Environment* 155:89-108.
- Federal Emergency Management Agency (2003) HAZUS@MH flood technical manual. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, FEMA, Mitigation Division, Washington, D.C, États-Unis, p 500.
- Fekete A (2009) Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9(2):393-403.
- Fernandez LS, Byard D, Lin CC, Benson S & Barbera JA (2002) Frail elderly as disaster victims: emergency management strategies. *Prehospital and disaster medicine* 17(02):67-74.
- Fernandez P, Mourato S, Moreira M & Pereira L (2016) A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C In Press*,(1-9).
- Ferrazzoli P & Guerriero L (1995) Modeling microwave emission from vegetation covered surfaces: a parametric analysis. In *Passive microwave remote sensing of land-atmosphere interactions*, Choudhury et al. (Édit.) VSP Press, The Netherlands. p 389-402.
- Financière Agricole du Québec (2012) Rapport Annuel 2011/2012. (Gouvernement du Québec, Québec, Canada), p 12.
- Flores De Santiago F, Kovacs JM & Lafrance P (2013) An object-oriented classification method for mapping mangroves in Guinea, West Africa, using multipolarized ALOS PALSAR L-band data. *Int. J. Remote Sens.* 34(2):563-586.
- Folke C (2006) Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16(3):253-267.
- Fox J & Weisberg S (2010) *An R Companion to Applied Regression*. Sage (Édit), Thousand Oaks, CA, États-Unis. 449 p.
- Franceschetti G, Iodice A & Riccio D (2002) A canonical problem in Electromagnetic Backscattering From Buildings. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40(8):1787-1801.
- Frazier K (1979) *The violent forces of nature: Severe Phenomena and Natural Disasters*. William Morrow & Co (Édit.); First Edition, New York. 386 p.

- Freudenberg M (2003) Composite Indicators of Country Performance. in *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*. OECD Publishing, Paris. 35p.
- Füssel H-M (2007) Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change* 17(2):155-167.
- Gallopín GC (1997) Indicators and their use: Information for Decision-Making. Part One: Introduction. *Sustainability Indicators: Report on the Project on Indicators of Sustainable Development, SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment)*, Billharz B. and Billharz, S. (Édit.) John Wiley, New York. p 13-27.
- Gallopín GC (2006) Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16(3):293-303.
- Geudtner D, Winter R & Vachon PW (1996) Flood monitoring using ERS-1 SAR interferometry coherence maps. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Lincoln, États-Unis, 21-26 mai 1996)*. p 966-968
- Giordano F, Goccia M & Dellepiane S (2005) Segmentation of coherence maps for flood damage assessment. *IEEE International Conference on Image Processing, 2005 (Gênes, Italie, 11-14 septembre 2005)*, p II-233-236.
- Girard MC (2010) *Traitement des données de télédétection - Environnement et ressources naturelles*. Dunod, Paris, France, Seconde édition. 576 p.
- Giustarini L, Hostache R, Matgen P, Schumann GJP, Bates PD & Mason DC (2013) A change detection approach to flood mapping in Urban areas using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(4):2417-2430.
- Giustarini L, Matgen P, Hostache R, Montanari M, Plaza D, Pauwels VRN, De Lannoy GJM, De Keyser R, Pfister L, Hoffmann L & Savenije HHG (2011) Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: A case study. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(7):2349-2365.
- Godschalk D (1991) Disaster mitigation and hazard management. *Emergency Management: Principles and Practices for Local Government*, Drabek. T and Hoetmer G.J. (Édit.) International City Management Association, Washington, DC, USA. p 131-160.
- Gouvernement du Canada (2016) *Préparez-vous. Trousse d'urgence de base*. <http://www.preparez-vous.gc.ca/cnt/kts/bsc-kt-fr.aspx> (Consulté le 10 août 2016)
- Gouvernement du Québec (2016) Le Plan Économique du Québec 2016-2017, p B.139-B.143.
- Green C (2004) The evaluation of vulnerability to flooding. *Disaster Prevention and Management: An International Journal* 13(4):323-329.
- Green C & Penning-Rowsell E (2007) More or less than words? Vulnerability as discourse. *Managing Coastal Vulnerability*, Mcfadden L, Cnicholls, R.J., Penning-Rowsell, E. (Édit.) Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas. p 29-43.

- Greifeneder F, Wagner W, Sabel D & Naeimi V (2014) Suitability of SAR imagery for automatic flood mapping in the Lower Mekong Basin. *International Journal of Remote Sensing* 35(8):2857-2874.
- Griot C (2003) *Vulnérabilité et risques liés au transport de matières dangereuses*. Thèse de doctorat (Université Paul-Valéry, Montpellier, France). 584 p.
- Griot C & Ayrat PA (2002) Terminologie en science du risque, d'après le document de travail du colloque international *Dire le risque: le risque mis en examen* (Mèze, France, 18-20 mai 2001), p 83.
- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2001) Résumé à l'intention des décideurs. Changements climatiques 2004: Impacts, Adaptation et Vulnérabilité. Un rapport du Groupe II du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Organisation Météorologique Internationale, Genève, Suisse), p 457.
- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2013) Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs. Cambridge University Press (Édit), Cambridge, UK. 50 p.
- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2014a) Changements climatiques 2014. Incidences, Adaptation et Vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge University Press (Édit), Cambridge, UK. 240 p.
- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2014) Changements climatiques 2014. Impacts, Adaptation et Vulnérabilité. Partie A: Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge University Press (Édit), Cambridge, UK. 40 p.
- Guha-Sapir D, Below R & Hoyois P (2015) *EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database*. (Université Catholique de Louvain, Belgique), http://www.emdat.be/disaster_list/index.html (Consulté le 13 septembre 2015)
- Guillard-Gonçalves C, Cutter SL, Emrich CT & Zêzere JL (2015) Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal. *Journal of Risk Research* 18(5):651-674.
- Hahmann T, Roth A, Martinis S, Twele A & Gruber A (2008) Automatic Extraction of Water Bodies from TerraSAR-X Data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008 (Boston, États-Unis, 7-11 juillet 2008)*. p III -103-III -106.
- Hahmann T, Twele A, Martinis S & Buchroithner M (2010) Strategies for the Automatic Extraction of Water Bodies from TerraSAR-X / TanDEM-X data. *Geographic Information and Cartography for Risk and Crisis Management*, Konecny M, Zlatanova S & Bandrova TL (Édit.) Springer Berlin Heidelberg. p 129-141.

- Haider S, Paquier A, Morel R & Champagne JY (2003) Urban flood modelling using computational fluid dynamics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering* 156(2):129-135.
- Hebb A & Mortsch L (2007) Floods: Mapping Vulnerability in the Upper Thames Watershed under a Changing Climate. Project Report XI. University of Waterloo, ON, Canada, p 53.
- Henderson FM & Lewis AJ (2008) Radar detection of wetland ecosystems: a review. *International Journal of Remote Sensing* 29(20):5809-5835.
- Henry JB (2004) *Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine*. Thèse de doctorat (Université Louis Pasteur, Strasbourg, France). 238 p.
- Henry JB, Chastanet P, Fellah K & Desnos YL (2006) Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing* 27(10):1921-1929.
- Herrera-Cruz V & Koudogbo F (2009) TerraSAR-X rapid mapping for flood events. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Hannovre, Allemagne, 2-5 juin 2009)*.
- Hess LL, Melack JM, Filoso S & Wang Y (1995) Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(4):896-904.
- Hess LL, Melack JM & Simonett DS (1990) Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing* 11(7):1313-1325.
- Hewitt K & Burton I (1971) *The Hazardousness of a Place; a Regional Ecology of Damaging Events*, University of Toronto Press, Toronto, Canada. 154 p.
- Hirabayashi Y & Kanae S (2009) First estimate of the future global population at risk of flooding. *Hydrological Research Letters* 3:6-9.
- Hoang KH (2013) *Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Cáu (Vietnam) au moyen d'images optiques et SAR en support à la modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada). 244 p.
- Holt B (2004) SAR imaging of the ocean surface. *SAR Marine User's Manual*, US (Department of Commerce and NOAA), Washington DC, États-Unis. p 25-79.
- Hoque R, Nakayama D, Matsuyama H & Matsumoto J (2011) Flood monitoring, mapping and assessing capabilities using RADARSAT remote sensing, GIS and ground data for Bangladesh. *Nat Hazards* 57(2):525-548.
- Horritt MS (1999) A statistical active contour model for SAR image segmentation. *Image and Vision Computing* 17(3-4):213-224.
- Horritt MS, Mason DC, Cobby DM, Davenport IJ & Bates PD (2003) Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment* 85(3):271-281.

- Horritt MS, Mason DC & Luckman AJ (2001) Flood boundary delineation from Synthetic Aperture Radar imagery using a statistical active contour model. *International Journal of Remote Sensing* 22(13):2489-2507.
- Hostache R (2006) *Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique*. Thèse de doctorat (Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Grenoble, France). 256 p.
- Hostache R, Matgen P, Schumann G, Puech C, Hoffmann L & Pfister L (2009) Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(2):431-441.
- Hostache R, Matgen P & Wagner W (2012) Change detection approaches for flood extent mapping: How to select the most adequate reference image from online archives? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19(0):205-213.
- Hostache R, Puech C & Raclot D (2005) Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeog: European Journal of Geography - Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005* Article 381.
- HR Wallingford (2005) Flood risk to people - Phase 2 The Flood Risks to People methodology. Flood and Coastal Defence R&D Programme. Department of the Environment, Flood and Rural Affairs – DEFRA, Londres, UK, p 384.
- Hubbard S, Stewart K & Fan J (2014) Modeling spatiotemporal patterns of building vulnerability and content evacuations before a riverine flood disaster. *Applied Geography* 52:172-181.
- Iervolino P, Guida R, Iodice A & Riccio D (2015) Flooding Water Depth Estimation With High-Resolution SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53(5):2295-2307.
- Institut National de Santé Publique du Québec (2012) Perception du risque d'inondation dans un contexte de changements climatiques: recension systématique des articles scientifiques sur sa mesure (1990-2011) (Gouvernement du Québec), p 15-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012) Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Édit.), Cambridge, University Press, Cambridge, p 582.
- Jankowski P (1995) Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International journal of geographical information systems* 9(3):251-273.
- Jha AK, Bloch R & Lamond J (2012) Cities and Flooding. A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. International Bank for Reconstruction and Development -The World Bank, Washington, D.C, États-Unis, p 55-62.
- Jin YQ (1999) A flooding index and its regional threshold value for monitoring floods in China from SSM/I data. *International Journal of Remote Sensing* 20(5):1025-1030.

- Joakim E (2008) *Assessing the 'Hazards of Place' Model of Vulnerability: A Case Study of Waterloo Region*. Thèse de maîtrise (Wilfried Laurier University, Waterloo, Canada). 164 p.
- Johnstone WM, Alexander D, Underwood D & Clark J (2006) LSM system V1.0: guidelines, procedures and calibration manuel. Engineering Report E310 (BC Hydro Engineering).
- Jones R & Boer R (2003) Assessing current climate risks. *Adaptation Policy Framework: A guide for Policies to Facilitate Adaptation to Climate Change*. Technical paper 4,(United Nations Development Programm). p 31-117.
- Jongman B, Kreibich H, Apel H, Barredo JI, Bates PD, Feyen L, Gericke A, Neal J, Aerts JCJH & Ward PJ (2012) Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12(12):3733-3752.
- Jongman B, Winsemius HC, Aerts JC, de Perez EC, van Aalst MK, Kron W & Ward PJ (2015) Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(18):E2271-E2280.
- Jonkman SN, Vrijling JK & Vrouwenvelder ACWM (2008) Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Nat Hazards* 46(3):353-389.
- Kakimoto R & Yamada F (2014) Factors in Simulating Evacuation Behavior During Floods. in *The Proceedings of the 10th International Conference of the International Institute for Infrastructure Resilience and Reconstruction* (Perdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 20-22 mai 2014), p 75-81.
- Kar B & Hodgson ME (2008) A GIS-Based Model to Determine Site Suitability of Emergency Evacuation Shelters. *Transactions in GIS* 12(2):227-248.
- Kasischke ES & Bourgeau-Chavez LL (1997a) Monitoring south Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 33:281-291.
- Kasischke ES, Melack JM & Craig Dobson M (1997b) The use of imaging radars for ecological applications—A review. *Remote Sensing of Environment* 59(2):141-156.
- Kass M, Witkin A & Terzopoulos D (1988) Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision* 1(4):321-331.
- Kaufmann D, Kraay A & Mastruzzi M (2009) Governance Matters VIII: Aggregate and Individual Governance Indicators, 1996-2008. World Bank Policy Research Working Paper, 105 p.
- Kaźmierczak A & Cavan G (2011) Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning* 103(2):185-197.
- Kergomard C (2000) Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo : European Journal of Geography [en ligne]*.
- Kienberger S, Lang S & Zeil P (2009) Spatial vulnerability units – expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9(3):767-778.

- Kittler J & Illingworth J (1985) Minimum error thresholding. *Pattern Recognition* 19:41-47.
- Kohonen T (1995) *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Science, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 502 p.
- Koks EE, Bočkarjova M, Moel H & Aerts JC (2015a) Integrated direct and indirect flood risk modeling: development and sensitivity analysis. *Risk analysis* 35(5):882-900.
- Koks EE, Jongman B, Husby TG & Botzen WJW (2015b) Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science & Policy* 47:42-52.
- Kongsomsaksakul S, Yang C & Chen A (2005) Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6:4237-4252.
- Krishnamurthy PK & Krishnamurthy L (2012) Social vulnerability assessment through GIS techniques: a case study of flood risk mapping in Mexico. *Geospatial Techniques for Managing Environmental Resources*, Thakur JK, Singh SK, Ramanathan AL, Prasad MBK & Gossel W (Édit.) Springer Netherlands. p 276-291.
- Kubal C, Haase D, Meyer V & Scheuer S (2009) Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9(6):1881-1895.
- Kusenbach M, Simms JL & Tobin GA (2009) Disaster vulnerability and evacuation readiness: coastal mobile home residents in Florida. *Nat Hazards* 52(1):79-95.
- Kussul N, Shelestov A & Skakun S (2008) Grid system for flood extent extraction from satellite images. *Earth Sci Inform* 1(3-4):105-117.
- Kussul N, Shelestov A & Skakun S (2011) Flood Monitoring from SAR Data Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. *NATO Security through Science Series: Environmental Security*, Kogan F, Powell A & Fedorov O (Édit.) Springer Netherlands. p 19-29.
- Lang M, Townsend P & Kasischke E (2008) Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment* 112(10):3898-3907.
- Lee JS, Jurkevich L, Dewaele P, Wambacq PI & Oosterlinck A (1994) Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Reviews* 8(4):313-340.
- Lee JS & Pottier E (2009) *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC Press, Boca Raton. 438 p.
- Liu Y, Nishiyama S & Yano T (2004) Analysis of four change detection algorithms in bi-temporal space with a case study. *International Journal of Remote Sensing* 25(11):2121-2139.
- Long S, Fatoyinbo TE & Policelli F (2014) Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters* 9(3).

- Lopes A, Nezry E, Touzi R & Laur H (1993) Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. *International Journal of Remote Sensing* 14(9):1735-1758.
- Lopes A, Touzi R & Nezry E (1990) Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 28(6):992-1000.
- Lumbroso D & Davison M (2016) Use of an agent-based model and Monte Carlo analysis to estimate the effectiveness of emergency management interventions to reduce loss of life during extreme floods. *Journal of Flood Risk Management*. In Press.
- Lumbroso D & Tagg A (2011a) Evacuation and loss of life modelling to enhance emergency response. *International Symposium on Urban Flood Risk Management*. (Graz, Austria, 21-23 September 2011).
- Lumbroso DM & Vinet F (2011b) A comparison of the causes, effects and aftermaths of the coastal flooding of England in 1953 and France in 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11(8):2321-2333.
- Macina F, Bignami C, Chini M & Pierdicca N (2006) Exploiting Physical and Topographic Information within a Fuzzy Scheme to Map Flooded Area by SAR. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium 2006 (Denver, CO, États-Unis, 31 juillet-4 août 2006)*. p 1052-1055.
- MacIntosh H & Profeti G (1995) The use of ERS SAR data to manage flood emergencies at the smaller scale. *2nd ERS Applications Workshop, Agence Spatiale Européenne*. (Londres, Royaume-Uni, décembre 1995).
- Maclaren VW (1996) Urban Sustainability Reporting. *Journal of the American Planning Association* 62(2):184-202.
- MacMillan A, Morley J, Adams BJ & Chesworth S (2006) Identifying Optimal SAR imagery Specifications for Urban Flood Monitoring: A Hurricane Katrina Case Study. in *4th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response* (Cambridge, Royaume-Uni, 25 septembre 2006).
- Mallinis G, Gitas IZ, Giannakopoulos V, Maris F & Tsakiri-Strati M (2011) An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *International Journal of Digital Earth* 6(Sup2):1-13.
- Malnes E, Guneriussen T & Høgda KA (2002) Mapping of flood-area by RADARSAT in Vannsjø, Norway. *Proceedings of the 29th International Symposium on Remote Sensing of the Environment (Buenos Aires, Argentine, 8-12 avril 2002)*.
- Manjusree P, Prasanna Kumar L, Bhatt C, Rao G & Bhanumurthy V (2012) Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. *Int J Disaster Risk Sci* 3(2):113-122.
- Marco JB (1994) Flood risk mapping. *Coping with Floods*, Rossi G, Harmancioğlu N & Yevjevich V (Édit.) Springer Netherlands, Dordrecht. p 353-373.

- Marinelli L, Michel R, Beaudoin A & Astier J (1997) Flood mapping using ERS tandem coherence image: a case study in south France. *Proceedings of the 3rd ERS Symposium (Florence, Italie, 17-21 Mars 1997)*. p 531-536.
- Marti-Cardona B, Lopez-Martinez C, Dolz-Ripolles J & Bladè-Castellet E (2010) ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment* 114(11):2802-2815.
- Martinis S (2010) *Automatic near real-time flood detection in high resolution X-band synthetic aperture radar satellite data using context-based classification on irregular graphs*. Thèse de doctorat (Ludwig-Maximilian University, Munich, Allemagne). 102 p.
- Martinis S, Kersten J & Twele A (2015a) A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104:203-212.
- Martinis S, Kuenzer C & Twele A (2015b) Flood Studies Using Synthetic Aperture Radar Datam, in *Remote sensing of water resources, disasters and urban studies*, Prasad S. and Thenkabail P. (Édit.) CRC Press, Boca Raton. p 673.
- Martinis S & Twele A (2010) A Hierarchical Spatio-Temporal Markov Model for Improved Flood Mapping Using Multi-Temporal X-Band SAR Data. *Remote Sensing* 2(9):2240.
- Martinis S, Twele A & Voigt S (2009) Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSar-X data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:303-314.
- Martinis S, Twele A & Voigt S (2011) Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using markov image modeling on irregular graphs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(1):251-263.
- Mason DC, Bates PD & Dall' Amico JT (2009) Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels. *Journal of Hydrology* 368(1-4):224-236.
- Mason DC, Davenport IJ, Neal JC, Schumann GJP & Bates PD (2011) A near real-time algorithm for flood detection in urban and rural areas using high resolution Synthetic Aperture Radar images. *2nd International Conference on Space Technology (ICST) 2011 (Athènes, Grèce, 15-17 septembre 2011)*.
- Mason DC, Davenport IJ, Neal JC, Schumann GJP & Bates PD (2012a) Near Real-Time Flood Detection in Urban and Rural Areas Using High-Resolution Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(8):3041-3052.
- Mason DC, Giustarini L, Garcia-Pintado J & Cloke HL (2014) Detection of flooded urban areas in high resolution Synthetic Aperture Radar images using double scattering. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 28(0):150-159.
- Mason DC, Horritt MS, Dall'Amico JT, Scott TR & Bates PD (2007) Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(12):3932-3943.

- Mason DC, Schumann GJP, Neal JC, Garcia-Pintado J & Bates PD (2012b) Automatic near real-time selection of flood water levels from high resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. *Remote Sensing of Environment* 124:705-716.
- Mason DC, Speck R, Devereux B, Schumann GJP, Neal JC & Bates PD (2010) Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(2):882-894.
- Matgen P, Hostache R, Schumann G, Pfister L, Hoffmann L & Savenije HHG (2011) Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth* 36(7-8):241-252.
- Matgen P, Schumann G, Henry JB, Hoffmann L & Pfister L (2007a) Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9(3):247-263.
- Matgen P, Schumann G, Pappenberger F & Pfister L (2007b) Sequential assimilation of remotely sensed water stages in flood inundation models. *IAHS Red Book Series, Remote Sensing for Environmental Monitoring and Change Detection. IAHS Publication* 3:78-88.
- Maybury RA (Édit) (1986) *Violent Forces of Nature*. (Lomond Publications and UNESCO) Mt Airy, AD, USA. 377 p.
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ & White KS (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. A report of Working group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 10 p.
- McClelland DM & Bowles DS (2000) Estimating Life Loss for Dam Safety and Risk Assessment: Lessons from Case Histories. *2000 Annual USCOLD Conference, U.S. Society on Dams (formerly U.S. Committee on Large Dams)*. (Denver, CO, 10-14 juillet 2000)
- McDonald A (1979) Floods—A geographical perspective. *Earth Surface Processes* 4(3):303-304.
- McLaughlin P & Dietz T (2008) Structure, agency and environment: Toward an integrated perspective on vulnerability. *Global Environmental Change* 18(1):99-111.
- Medalie L & Olson SA (2013) High-water marks from flooding in Lake Champlain from April through June 2011 and Tropical Storm Irene in August 2011 in Vermont. (U.S Geological Survey Data Series 763), p 11.
- Meinel G & Neubert M (2003) A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. *Proceedings of the Joint ISPRS/EARSel Workshop "High Resolution Mapping from Space 2003" (Hannovre, Allemagne, 6-8 octobre 2003)*.
- Mercier D & Chadenas C (2012) La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée). *Noréis* 222:45-60.

- Merz B, Thieken AH & Gocht M (2007) Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges. *Flood Risk Management in Europe*, Begum S, Stive M & Hall J (Édit.) Springer Netherlands, Vol 25. p 231-251.
- Messner F & Meyer V (2006) Flood damage, vulnerability and risk perception - Challenges for flood damaged research. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, Schanze J, Zeman E & Marsalek J (Édit.) Springer Netherlands, Dordrecht. p 149-167.
- Metzger P & D'Ercole R (2011) Les risques en milieu urbain: éléments de réflexion. *ÉchoGéo [En ligne]*, 18.
- Meyer V, Scheuer S & Haase D (2008) A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Nat Hazards* 48(1):17-39.
- Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer (2015) Géorisques. <http://www.georisques.gouv.fr/> (Consulté le 11 septembre 2015)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec (2008) *Géoboutique Québec - Cartes topographiques à l'échelle 1/20 000.*, <http://geoboutique.mern.gouv.qc.ca/edel/pages/recherche/critereRechercheEdel.faces> (Consulté le 13 mai 2015)
- Ministère de la Sécurité Publique (2008) Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités. (Gouvernement du Québec), 98 p.
- Ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du Territoire (2014) Le rôle d'évaluation foncière et son contenu. Document à l'intention des citoyens. (Gouvernement du Québec), 12 p.
- MM Group Limited (2014) National Floodplain Mapping Assessment. Rapport préparé pour Sécurité Publique Canada, 68 p.
- Montgomery B (2015) *Expanding and comparing GIS -based multi-criteria decision making methods: A soft computing logic for agricultural land suitability evaluation*. MSc (Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada). 118 p.
- Montz BE & Evans TA (2001) Gis and Social Vulnerability Analysis. *Coping With Flash Floods*, Grunfest E & Handmer J (Édit.) Springer Netherlands, Dordrecht. p 37-48.
- Morin M (2008) Concepts de base en sécurité civile. Ministère de la Sécurité Publique. (Gouvernement du Québec), 60 p.
- Müller A (2013) Flood risks in a dynamic urban agglomeration: a conceptual and methodological assessment framework. *Nat Hazards* 65(3):1931-1950.
- Müller A, Reiter J & Weiland U (2011) Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach – a case study for Santiago de Chile. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11(8):2107-2123.

- Myers CA, Slack T & Singelmann J (2008) Social vulnerability and migration in the wake of disaster: the case of Hurricanes Katrina and Rita. *Population and Environment* 29(6):271-291.
- Neal J, Fewtrell TJ, Bates P & Wright NG (2010) A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. *Environmental Modelling & Software* 25:398-411.
- Néelz S, Pender G, Villanueva M, Wilson M, Wright NG, Bates P, Mason D & Whitlow C (2006) Using remotely sensed data to support flood modelling. *Water Management* 159(WMI):35-43.
- Néogis (2015) LIDAR aéroporté au Québec, défis et opportunités dans un contexte de gestion territoriale. *21ème Journée de l'innovation en géomatique*. (Centre Canadien de cartographie et d'observation de la terre, Sherbrooke, Canada, 4 juin 2015).
- Nico G, Pappalepore M, Pasquariello G, Refice A & Samarelli S (2000) Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods - A GIS application. *International Journal of Remote Sensing* 21(8):1619-1631.
- O'Grady D, Leblanc M & Gillieson D (2013) Relationship of local incidence angle with satellite radar backscatter for different surface conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 24(1):42-53.
- Oberstadler R, HÖNsch H & Huth D (1997) Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: a case study in Germany. *Hydrol. Process.* 11(10):1415-1425.
- Organisation de la Sécurité Civile du Québec (2008) Cadre de coordination de site de sinistre au Québec. (Gouvernement du Québec, Québec), 40 p.
- Organisation de la Sécurité Civile du Québec (2013) Rapport d'évènement, Inondations printanières Montérégie 2011. (Gouvernement du Québec, Québec). 19 p.
- Organization for Economic Cooperation and Development (2008) Handbook of constructing composite indicators: methodology and user guide. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, France. 162 p.
- Ormsby JP, Blanchard BJ & Blanchard AJ (1985) Detection of lowland flooding using active microwave systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51(3):317-329.
- Otsu N (1979) A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9:62.
- Ouma YO & Tateishi R (2014) Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water* 6(6):1515-1545.
- OXFAM America (2009) Exposed: social vulnerability and climate change in the US southeast. 24 p.

- Pappenberger F, Frodsham K, Beven K, Romanowicz R & Matgen P (2007) Fuzzy set approach to calibrating distributed flood inundation models using remote sensing observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(2):739-752.
- Parker DJ (2000) Managing flood hazards and disasters - International lessons, directions and future challenges. *Floods*, Parker DJ (Édit.) Routledge, London and New York. p 287-306.
- PCI Geomatica (2005) Geomatica OrthoEngine User Guide, (PCI Geomatica Enterprises Inc.), Richmond Hill, ON, Canada, p 168.
- Pellizzeri TM, Gamba P, Lombardo P, Dell'Acqua F, Tortora A (2003) Flood monitoring in urban areas: Statistical vs. neurofuzzy approach. *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas* (Berlin, Allemagne, 22-23 mai 2003).
- Penning-Rowsell E, Floyd P, Ramsbottom D & Surendran S (2005) Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework. *Nat Hazards* 36(1):43-64.
- Pierdicca N, Chini M, Pulvirenti L & Macina F (2008) Integrating physical and topographic information into a fuzzy scheme to map flooded area by SAR. *Sensors* 8(7):4151-4164.
- Pierdicca N, Pulvirenti L, Chini M, Boni G, Squicciarino G & Candela L (2014) Flood mapping by SAR: Possible approaches to mitigate errors due to ambiguous radar signatures. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Québec, Canada, 13-18 july 2014), p 3850-3853.
- Pierdicca N, Pulvirenti L, Chini M, Guerriero L & Candela L (2013) Observing floods from space: Experience gained from COSMO-SkyMed observations. *Acta Astronautica* 84(0):122-133.
- Pierdicca N, Pulvirenti L, Chini M, Guerriero L, Ferrazzoli P (2010) A fuzzy-logic based approach for flood detection from COSMO-SkyMed data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Honolulu, Hawaï, USA, 25-30 juillet 2010), p 4796-4798.
- Pitt M (2008) Learning Lessons From the 2007 Floods, (United Kingdom Cabinet Office Report), Londres, UK, 505 p.
- Porter K, Wein A, Alpers C, Baez A, Barnard P, Carter J, Corsi A, Costner J, Cox D, Das T, Dettinger M, Done J, Eadie C, Eymann M, Ferris J, Gunturi P, Hughes M, Jarrett R, Johnson L, Dam Le-Griffin H, Mitchell D, Morman S, Neiman P, Olsen A, Perry S, Plumlee G, Ralph M, Reynolds D, Rose A, Schaefer K, Serakos J, Siembieda W, Stock J, Strong D, Sue Wing I, Tang A, Thomas P, Topping K & Wills C (2010) Overview of the ARkStorm Scenario. (U.S Geological Survey Multihazards Demonstration Project, Open-File Report, 2010-1312), p 183.
- Pottier N (2006) *Les risques naturels « aquatiques »: Le risque inondation.* http://www.uved.fr/fileadmin/user_upload/modules_introductifs/module3/risques/2.1.2/html/2.html (Consulté le 25 Septembre 2015)
- Prasad S (2012) Using GIS to examine evacuation need and shelter locations in Broward County, Florida. in *Papers of the Applied Geography Conferences* (Mineapolis, MN, USA, octobre 2012) p 272-279.

- Prasad S (2016) Assessing the need for evacuation assistance in the 100 year floodplain of South Florida. *Applied Geography* 67:67-76.
- Priest S, Wilson T & Tapsell SM (2007) Building a model to estimate risk to life for European flood events - Final Report. in *FloodSite Project report* (European Commission). 265 p.
- Programme Associé sur la Gestion des Crues (2009) Integrated flood management concept paper, (Organisation Météorologique Mondiale), Genève, Suisse, 32 p.
- Programme des Nations Unies pour le Développement (2004) *Reducing disaster risk: a challenge for development. A global report*. United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York, USA, 32 p.
- Provitolo D (2007) Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Annales de géographie* I(653):23-40.
- Puech C & Raclot D (2002) Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods. *Hydrol. Process.* 16(8):1593-1602.
- Pulvirenti L, Chini M, Pierdicca N & Boni G (2015) Use of SAR Data for Detecting Floodwater in Urban and Agricultural Areas: The Role of the Interferometric Coherence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (99):1-13.
- Pulvirenti L, Chini M, Pierdicca N, Guerriero L & Ferrazzoli P (2011a) Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. *Remote Sensing of Environment* 115:990-1002.
- Pulvirenti L, Marzano FS, Pierdicca N, Mori S & Chini M (2013a) Discrimination of Water Surfaces, Heavy Rainfall, and Wet Snow Using COSMO-SkyMed Observations of Severe Weather Events. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Pulvirenti L, Pierdicca N, Boni G, Fiorini M, Rudari R & Ferraris L (2014) Combined use of COSMO-SkyMed derived products and hydrodynamic models to produce physically-based maps of flood extent. *Sar Image Analysis, Modeling, and Techniques Xiv*, (Proceedings of SPIE, Notarnicola C, Paloscia S & Pierdicca N (Édit.) Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham Vol 9243.
- Pulvirenti L, Pierdicca N, Chini M & Guerriero L (2011b) An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Science* 11(2):529-540.
- Pulvirenti L, Pierdicca N, Chini M & Guerriero L (2013b) Monitoring Flood Evolution in Vegetated Areas Using COSMO-SkyMed Data: The Tuscany 2009 Case Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 52(2): 858-869.
- Raclot D & Puech C (2003) What does AI contribute to hydrology? Aerial photos and flood levels. *Applied Artificial Intelligence* 17(1):71-86.
- Ramsbottom D, Floyd P & Penning-Rowsell E (2003) R&D Technical report: Flood risks to people. Phase 1. FD2317TR. Department for the Environment, Food and Rural Affairs/Environment Agency – DEFRA. 103 p.

- Ramsbottom D, Wade S, Bain V, Hassan M, Penning-Rowsell E, Wilson T, Fernandez A, House M & Floyd P (2004) R&D outputs: Flood risks to people. Phase 2. FD2321/IR2. Department for the Environment, Food and Rural Affairs/Environment Agency - DEFRA. 384 p.
- Ramsey EW (1995) Monitoring flooding in coastal wetlands by using radar imagery and ground-based measurements. *International Journal of Remote Sensing* 16(13):2495-2502.
- Rashed T & J. W (2003) Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *International Journal of Geographical Information Science* 17(6).
- Rashid H, Haider W & McNeil D (2007) Urban riverbank residents' evaluation of flood evacuation policies in Winnipeg, Manitoba, Canada. *Environmental Hazards* 7(4):372-382.
- Rees (2011) *Physical Principles of Remote Sensing*. 3ème édition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 460p.
- Refice A, Capolongo D, Pasquariello G, D'Addabbo A, Bovenga F, Nutricato R, Lovergine FP & Pietranera L (2014) SAR and InSAR for Flood Monitoring: Examples With COSMO-SkyMed Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7):2711-2722.
- Renard D & Chapon PM (2010) Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise. *L'Espace Géographique* 39(1).
- Ressources Naturelles Canada (2016) *Données gratuites Géogratias - Réseau routier national, Québec*. <http://geogratias.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/eb389edd-6bbc-4ce2-a8ae-baf2475cd4c9.html> (Consulté le 3 avril 2016)
- Richards JA (2009) *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer Berlin Heidelberg. XIX, 361 p.
- Robert B, Rouselle J & Marche C (2001) Automatisation de la planification des mesures d'urgence pour les municipalités à risque d'inondation. Sécurité Publique et Protection civile Canada, Ottawa, Canada, 49 p.
- Ryan BJ (2007) International Charter on Space and Major Disasters. *5th International Symposium on Remote Sensing Applications to Natural Hazards*. (Washington, D.C., 12 septembre 2001), 32 p.
- Rygel L, O'sullivan D & Yarnal B (2006) A Method for Constructing a Social Vulnerability Index: An Application to Hurricane Storm Surges in a Developed Country. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(3):741-764.
- Saaty TL (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15(3):234-281.
- Saaty TL (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. MacGraw-Hill, New-York, USA.
- Saaty TL (1994) Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 74(3):426-447.

- Saaty TL (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1):83-98.
- Salvia M, Grings F, Ferrazzoli P, Barraza V, Douna V, Perna P, Bruscantini C & Karszenbaum H (2011) Estimating flooded area and mean water level using active and passive microwaves: the example of Parana River Delta floodplain. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(8):2679-2692.
- Sanyal J & Lu XX (2004) Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: A review. *Nat Hazards* 33(2):283-301.
- Sanyal J & Lu XX (2009) Ideal location for flood shelter: a geographic information system approach. *Journal of Flood Risk Management* 2(4):262-271.
- Scarwell HJ & Laganier R (2004) *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Les Presses Universitaires du Septentrion (Édit.), Villeuneuve d'Asc, France, 240 p.
- Schanze J (2006) Flood risk management - a basic framework. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, (NATO Science Series, Schanze J, Zeman E & Marsalek J (Édit.) Springer Netherlands, Vol 67. p 1-20.
- Scherer D, Hall DK, Hochschild V, König M, Winther J-g, Duguay CR, Pivot F, Mätzler C, Rau F, Seidel K, Solberg R & Walker AE (2005) Remote Sensing of Snow Cover. *Remote Sensing in Northern Hydrology: Measuring Environmental Change* Pietroniro CRDaA (Édit.) American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Scheuer S, Haase D & Meyer V (2011) Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point view towards an end point view of vulnerability. *Nat Hazards* 58(2):731-751.
- Schlaffer S, Matgen P, Hollaus M & Wagner W (2015) Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38:15-24.
- Schmidtlein MC, Shafer JM, Berry M & Cutter SL (2011) Modeled earthquake losses and social vulnerability in Charleston, South Carolina. *Applied Geography* 31(1):269-281.
- Schmitt A, Wessel B & Roth A (2010) Curvelet-based Change Detection on SAR Images for Natural Disaster Mapping. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* (6):463-474.
- Schneiderbauer S (2007) *Risk and vulnerability to natural disasters - from broad view to focused perspective*. Thèse de doctorat (Université de Berlin, Berlin). 125 p.
- Schneiderbauer S & Ehrlich D (2004) Risk, hazard and people's vulnerability to natural hazards. *A Review of Definitions, Concepts and Data*. European Commission Joint Research Centre. EUR 21410:40.
- Schröter K, Kreibich H, Vogel K, Riggelsen C, Scherbaum F & Merz B (2014) How useful are complex flood damage models? *Water Resources Research* 50(4):3378-3395.

- Schumann G, Bates P, Di Baldassarre G & Mason D (2012) The Use of Radar Imagery in Riverine Flood Inundation Studies. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, Carbonneau P & Piégay P (Édit.) John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. p 115-140.
- Schumann G, Bates PD, Horritt MS, Matgen P & Pappenberger F (2009a) Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Reviews of Geophysics* 47(3).
- Schumann G & Di Baldassarre G (2010a) The direct use of radar satellites for event-specific flood risk mapping. *Remote Sensing Letters* 1(2):75-84.
- Schumann G, Di Baldassarre G, Alsdorf D & Bates PD (2010b) Near real-time flood wave approximation on large rivers from space: Application to the River Po, Italy. *Water Resources Research* 46(5):1-8.
- Schumann G, Di Baldassarre G & Bates PD (2009b) The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(8):2801-2807.
- Schumann G, Hostache R, Puech C, Hoffmann L, Matgen P, Pappenberger F & Pfister L (2007) High-Resolution 3-D Flood Information From Radar Imagery for Flood Hazard Management. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(6):1715-1725.
- Schumann G, Matgen P, Cutler MEJ, Black A, Hoffmann L & Pfister L (2008) Comparison of remotely sensed water stages from LIDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63(3):283-296.
- Schumann G, Neal J, Mason D & Bates P (2011) The accuracy of sequential aerial photography and SAR data for observing urban flood dynamics, a case study of the UK summer 2007 floods. *Remote Sensing of Environment* 115(10):2536-2546.
- Sebald C (2010) *Towards an integrated flood vulnerability index: A flood vulnerability assessment*. Thèse de maîtrise (Université of Twente, Enschede, Pays-Bas). 85 p.
- Sécurité Publique Canada (2009) *Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles*. Gouvernement du Canada. Ottawa, Canada, 12 p.
- Sécurité Publique Canada (2010) *Guide pour la planification de la gestion des urgences 2010-2011*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Canada, 73 p.
- Sécurité Publique Canada (2015) *Base de données canadienne sur les catastrophes*., <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/cndn-dsstr-dtbs/index-fra.aspx> (Consulté le 15 Septembre 2015)
- Selvi C & Sathya S (2014) Flood identification using satellite images. *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation energy* 3(1):6497-6504.
- Senthilnath J, Shenoy HV, Rajendra R, Omkar SN, Mani V & Diwakar PG (2013) Integration of speckle de-noising and image segmentation using Synthetic Aperture Radar image for flood extent extraction. *Journal of Earth System Science* 122(3):559-572.

- Sherali HD, Carter TB & Hobeika AG (1991) A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological* 25(6):439-452.
- Sibson R (1981) A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpreting Multivariate Data*, Barnett V (Édit.) John Wiley & Sons, Chichester, UK, p 21-36.
- Silveira M & Heleno S (2009) Separation Between Water and Land in SAR Images Using Region-Based Level Sets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 6(3):471-475.
- Simelton E, Fraser EDG, Termansen M, Forster PM & Dougill AJ (2009) Typologies of crop-drought vulnerability: an empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961–2001). *Environmental Science & Policy* 12(4):438-452.
- Simonovic SP & Ahmad S (2005) Computer-based Model for Flood Evacuation Emergency Planning. *Nat Hazards* 34(1):25-51.
- Sippel SJ, Hamilton SK, Melack JM & Novo EMM (1998) Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River Floodplain. *International Journal of Remote Sensing* 19(16):3055-3074.
- Smit B & Wandel J (2006) Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3):282-292.
- Smith LC (1997) Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrol. Process.* 11(10):1427-1439.
- Soergel U (Édit.) (2010) Review of Radar Remote Sensing on Urban Areas. in *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Springer Netherlands, Vol 15. p 1-47.
- Soergel U, Schulz K, Thoennesen U & Stilla U (2005) Integration of 3D data in SAR mission planning and image interpretation in urban areas. *Information Fusion* 6(4):301-310.
- Soergel U, Thoennesen U & Stilla U (2003) Visibility analysis of man-made objects in SAR images. *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Berlin, Allemagne, 22-23 Mai 2003)* p 120-124.
- Solbø S & Solheim I (2005) Towards operational flood mapping with satellite SAR. *Envisat and ERS Symposium 2004 (Salzburg, Autriche, 6-10 Septembre 2005)*. p 1603-1609.
- Song YS, Sohn HG & Park CH (2007) Efficient water area classification using Radarsat-1 SAR imagery in a high relief mountainous environment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73(3):285-296.
- Speck R, Turchi P & Süß H (2007) An end-to-end simulator for high-resolution spaceborne SAR systems. in *Spie Defence and Security 2007 (Orlando, FL, États-Unis, 9-13 Avril 2007)*.
- Srivastava HS, Patel P, Manchanda ML & Adiga S (2003) Use of multiincidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(7):1638-1640.

- Stabel ME & Löffler E (2003) Optimised mapping of flood extent and floodplain structures by radar EO-methods. *Proceedings of FRINGE 2003 Workshop (Frascati, Italie, 1-3 Décembre 2003)*. p 357-363.
- Statistique Canada (2013) *Guide de l'utilisateur de l'Enquête Nationale auprès des Ménages 2011.*, https://www12.statcan.gc.ca/nhs-enm/2011/ref/nhs-enm_guide/index-fra.cfm (Consulté le 11 août 2016)
- Statistique Canada (2015) *Recensement de 2011 - Fichiers des limites.*, <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/geo/bound-limit/bound-limit-2011-fra.cfm> (Consulté le 20 août 2016)
- Statistique Canada (2016a) *Rapport technique du recensement: Couverture. Section 2: Univers du recensement.* (Gouvernement du Canada) <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/ref/guides/98-303-x/index-fra.cfm> (Consulté le 11 août 2016)
- Statistique Canada (2016b) *Rapport technique du recensement: Couverture. Section 3: Erreurs de couverture de la population.* (Gouvernement du Canada) <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/ref/guides/98-303-x/ch3-fra.cfm> (Consulté le 11 août 2016)
- Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes des Nations Unies (2009) Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe. (UNISDR), 73 p.
- Tate E (2012) Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. *Nat Hazards* 63(2):325-347.
- Thieken A, Ackermann V, Elmer F, Kreibich H, Kuhlmann B, Kunert U, Maiwald H, Merz B, Müller M & Piroth K (2008) Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. *Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability (Toronto, ON, Canada, 6-8 mai 2008)*. p 110.
- Thomas I, Bleau N, P.S. A, Desjardins-Dutil G, Fuamba M & Kadi S (2012) Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal. Rapport final pour Ouranos, p 137.
- Thywissen K (2006) Components of risk. A comparative glossary. in *Source of the University: Research, Counsel, Education*, (UNU-EHS Source), p 52.
- Torterotot JP (1993) *Cost of damage due to river flooding: assessment and uncertainty analysis.* Thèse de doctorat (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, France). 304 p.
- Toutin T (1995) Generating DEM from stereo images with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data. *EARSel Journal of Advanced Remote Sensing* 4(2):110-117.
- Toutin T (2004) Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing* 25(10):1893-1924.

- Toutin T & Chenier R (2009) 3-D Radargrammetric Modeling of RADARSAT-2 Ultrafine Mode: Preliminary Results of the Geometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 6(3):611-615.
- Touzi R, Boerner WM, Lee JS & Lueneburg E (2004) A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30(3):380-407.
- Townsend PA (2001) Mapping Seasonal Flooding in Forested Wetlands Using Multi-Temporal Radarsat SAR. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67(7):857-864.
- Townsend PA (2002) Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR. *International Journal of Remote Sensing* 23(3):443-460.
- Townsend PA & Walsh SJ (1998) Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology* 21(3–4):295-312.
- Töyrä J, Pietroniro A & Martz LW (2001) Multisensor Hydrologic Assessment of a Freshwater Wetland. *Remote Sensing of Environment* 75(2):162-173.
- Turner BL, Kasperson RE, Matson PA, McCarthy JJ, Corell RW, Christensen L, Eckley N, Kasperson JX, Luers A, Martello ML, Polsky C, Pulsipher A & Schiller A (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100(14):8074-8079.
- Ulaby FT & Long DG (2014) *Microwave radar and radiometric remote sensing*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, États-Unis. 986 p.
- Ulaby FT, Moore RK & Fung AK (1982) *Microwave Remote Sensing Active and Passive: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Addison-Wesley, Reading, MA, États-Unis. 608 p.
- Ulaby FT, Moore RK & Fung AK (1986a) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive: Volume Scattering and Emission Theory, Advances System and Applications*. Addison-Wesley Publishing Compagny, Reading, Maine, États-Unis. 2162 p.
- Ulaby FT, Moore RK & Fung AK (1986b) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Volume 3: From Theory to Applications*. Artech House, Norwood, MA, USA, 1120 p.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2004) Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. (United Nations, Genève, Suisse), 431 p.
- United States Agency for International Development (2014) Design and Use of Composite Indices in Assessments of Climate Change Vulnerability and Resilience. in *African and latin american resilience to climate change (ARCC)*, United States Government, Washington, DC, USA. 60 p.
- Van der Sande CJ, De Jong SM & De Roo APJ (2003) A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(3):217-229.

- Vári A, Ferencz Z & Hochrainer-Stigler S (2013) Social Indicators of Vulnerability to Floods: An Empirical Case Study in Two Upper Tisza Flood Basins. *Integrated Catastrophe Risk Modeling: Supporting Policy Processes*, Amendola A, Ermolieva T, Linnerooth-Bayer J & Mechler R (Édit.) Springer Netherlands. p 181-198.
- Veyret Y & Reghza M (2006) Vulnérabilité et risques, l'approche récente de la vulnérabilité. *Responsabilité et environnement* 43:9-14.
- Villagan de Leon J (2006) Vulnerability. A conceptual and methodological review. Source 4/2006. (Publication Series of the UNU-EHS) Bonn, Allemagne, 68 p.
- Vinet F (2010) *Le risque inondation, diagnostic et Gestion*. Tec & Doc Lavoisier (Édit.), coll. « Science du Risque et du Danger », 318 p.
- Vogel K & O'Brien K (2004) Vulnerability and global environmental change : rhetoric and reality. *Aviso : an information bulletin on global environmental change and human security* (13).
- Voigt S, Martinis S, Zwenzner H, Hahmann T, Twele A & Schneiderhan T (2008) Extraction of flood masks using satellite based very high resolution SAR data for flood management and modeling. in *4th International Symposium on Flood Defence (Toronto, Ontario, Canada, 6-8 Mai 2008)*.
- Wang Y (2004) Seasonal change in the extent of inundation on floodplains detected by JERS-1 Synthetic Aperture Radar data. *International Journal of Remote Sensing* 25(13):2497-2508.
- Wang Y, Hess LL, Filoso S & Melack JM (1995) Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. *Remote Sensing of Environment* 54(3):324-332.
- Wang Y, Li Z, Tang Z & Zeng G (2011) A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management* 25(13):3465-3484.
- Watson DF & Philip GM (1985) A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing* 2:315-327.
- Watts S & Wicks DC (1990) Empirical models for detection prediction in distribution radar sea clutter. *Record of the IEEE 1990 International Radar Conference* (Arlington, VA, USA, 7-10 May 1990), p 189-194.
- Wein A, Ratliff J, Báez A & Sleeter R (2014) Regional Analysis of Social Characteristics for Evacuation Resource Planning: ARkStorm Scenario. *Natural Hazards Review* 17(4): p 67-76.
- Wendleder A, Wessel B, Roth A, Breunig M, Martin K & Wagenbrenner S (2013) TanDEM-X Water Detection Indication Mask: Generation and First Evaluation Results. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 6(1):171-179.
- Weydahl DJ (1996) Flood monitoring in Norway using ERS-1 SAR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996 (Lincoln, NB, Canada, 27-31 mai 1996)*. p 151-153.

- White GF (1975) *Natural Hazard: Local, National, Global*. Oxford University Press, New York. 288 p.
- Wisner B, Blaikie P, Cannon T & Davis I (2004) *At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. 2ème édition, Routledge, London and New York, 496 p.
- Wood NJ, Burton CG & Cutter SL (2010) Community variations in social vulnerability to Cascadia-related tsunamis in the U.S. Pacific Northwest. *Nat Hazards* 52(2):369-389.
- Yoon DK (2012) Assessment of social vulnerability to natural disasters: a comparative study. *Nat Hazards* 63(2):823-843.
- Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3):338-353.
- Zhai G, Fukuzono T & Ikeda S (2006) An empirical model of fatalities and injuries due to flood in Japan. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 42(4):863-875.
- Zwenzner H & Voigt S (2009) Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(5):567-576.

ANNEXE I

CARACTÉRISTIQUES ET IMPACTS HUMAINS ET ÉCONOMIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES D'INONDATION

Cette annexe apporte une description détaillée des caractéristiques et des impacts humains et économiques des différents types d'inondation pouvant toucher les milieux urbains et ruraux.

1. Les inondations fluviales ou de plaine

Les inondations fluviales ont lieu quand le ruissellement des eaux de surface excède la capacité du cours d'eau à évacuer l'eau. L'excès d'eau déborde alors hors du lit du cours d'eau et s'étend dans les plaines inondables adjacentes. Ces inondations sont la résultante de pluies prolongées mais d'intensité modérée qui saturent les sols ou encore d'une fonte importante du couvert de neige. Certaines études leur donnent également pour origine une obstruction du chenal du cours d'eau par des débris, par un glissement de terrain ou encore par un embâcle de glace. Dans les pays nordiques comme le Canada, les inondations par embâcles sont particulièrement fréquentes, et peuvent représenter une des principales causes d'inondations (Beltaos, 1995).

Ces inondations sont généralement caractérisées par une cinétique lente. Les eaux d'inondation montent de manière progressive et la décrue n'a souvent pas lieu avant plusieurs jours. Les risques liés à ce type d'inondation sont relativement limités pour la population, bien que des problèmes sanitaires puissent apparaître lors d'une inondation prolongée. Les dommages sont ainsi avant tout matériels, et augmentent avec la durée de submersion. A l'inverse, lors de la rupture d'un embâcle, les eaux d'inondation montent de manière soudaine et souvent violente, et ont une charge alluviale élevée et un fort pouvoir érosif, ce qui rend les risques économiques et humains élevés. Cependant, la surveillance de plus en plus importante des cours d'eau permet d'augmenter le temps d'alerte et d'évacuation, et ainsi de diminuer les risques humains.

2. Les inondations pluviales urbaines

Les inondations pluviales font référence à des événements d'inondation causés par des pluies orageuses intenses (de quelques dizaines à plus d'une centaine de millimètres en quelques

heures) ou à un cumul important de pluie durant plusieurs jours, qui dépassent les capacités d'absorption des sols et d'évacuation des eaux des réseaux d'assainissement des eaux pluviales. Le ruissellement des eaux est accentué par l'imperméabilisation de plus en plus importante des sols en milieux urbains (bâtiments, stationnements, voirie, etc.) qui limite grandement l'infiltration des eaux de pluie. Les eaux non absorbées par les sols ou par le réseau d'assainissement ruissellent et s'accumulent dans les zones de plus faible altitude, parfois en dehors de tout réseau hydrographique apparent. Les inondations pluviales urbaines sont caractérisées par une montée rapide des eaux et par des hauteurs de submersion importantes, dépassant parfois plusieurs mètres. La vitesse d'écoulement est élevée, avec des eaux pouvant être boueuses et chargées de matériaux divers. Outre des inondations importantes aux points bas, ce phénomène peut générer des débordements de cours d'eau ainsi qu'une saturation ou une obstruction des réseaux unitaires et pluviaux, pouvant se traduire par un refoulement des eaux et une inondation importante de la voirie et des bâtiments. Compte tenu du caractère urbain de ces inondations et des temps souvent réduits d'alerte et d'évacuation, le risque humain associé aux inondations pluviales peut être élevé. Il en résulte également d'importants dommages économiques, et un dysfonctionnement majeur des systèmes urbains.

3. Les inondations estuariennes et côtières

Les inondations côtières sont dues à la conjonction d'une onde de tempête, causée par un fort système dépressionnaire entraînant une élévation temporaire du niveau moyen de la surface de la mer, combinée à des vents forts. Ces vents forts soufflent l'eau vers le rivage et créent de hautes vagues, qui font rentrer l'eau dans les terres lorsque la côte n'est pas protégée, ou qui font déborder l'eau au-dessus des ouvrages de protection comme les digues et les dunes (phénomène de surverse). L'eau de mer peut alors envahir les bords de mer sur plusieurs dizaines voire centaines de mètres. L'impact de ces ondes de tempête est particulièrement fort quand elles coïncident avec des coefficients de marée élevés, qui font augmenter le niveau de la mer de plusieurs mètres. Ces inondations, bien que rares, ont un impact significatif car elles touchent souvent des espaces littoraux fortement anthropisés. Ces inondations, plutôt lentes, sont caractérisées par des hauteurs de submersion moyennes, dépassant rarement le mètre. Les temps d'alerte avant de tels événements étant généralement longs, les risques humains liés aux inondations côtières sont limités. Les dommages économiques qui leur sont liés sont

cependant généralement élevés, avec la destruction ou l'endommagement fréquent de routes, du réseau électrique, de bâtiments, etc.

Occasionnellement, ce phénomène peut être amplifié par des inondations fluviales, et résultent en des inondations dites estuariennes. L'augmentation du niveau de la mer dans l'estuaire a pour effet de ralentir fortement l'évacuation à l'exutoire des eaux d'inondation venant des terres, ce qui produit une augmentation des niveaux d'eau dans le fleuve déjà en crue. Si la surcote à l'embouchure du fleuve est combinée à des vents forts soufflant dans l'axe de l'estuaire, les eaux d'inondation fluviale peuvent être refoulées dans les terres, et ainsi faire augmenter de manière significative les niveaux d'eau d'aval en amont du fleuve en crue.

4. Les inondations par remontée de nappe phréatique

Les inondations par remontée de nappe phréatique sont dues à des pluies souvent peu intenses mais successives et prolongées, qui saturent les sols et rechargent la nappe jusqu'à ce que son niveau atteigne la surface du sol, ou qui viennent recharger une nappe dont le niveau d'étiage est déjà élevé (c'est particulièrement le cas à la fin de l'hiver et au début du printemps). Ces inondations spontanées ont lieu le plus souvent dans les plaines alluviales aux sols calcaires. Les temps de réponse des aquifères calcaires étant longs, la montée des eaux et la décrue se font de manière lente et progressive. Les hauteurs de submersion sont faibles, et dépassent rarement le mètre. Le risque humain qui leur est associé est ainsi très faible. Les dommages sont avant tout économiques, et augmentent avec la durée de submersion. Ils consistent avant tout en des inondations de sous-sols, des fissures sur les immeubles, des dommages aux réseaux routiers, aux ouvrages de génie civil, etc.

5. Les inondations par rupture accidentelle d'ouvrages de retenue d'eau

Les inondations par rupture accidentelle d'ouvrages de retenue d'eau (barrage, digues) sont dues à des défauts de conception, de fonctionnement ou d'entretien d'un ouvrage (crue de projet mal évaluée, fondations défailantes, manque d'entretien, etc.), le plus souvent combinés à des événements naturels, tels qu'un séisme, une crue dépassant la crue de projet, un glissement de terrain ou encore une submersion marine. Dans de rares cas, ils peuvent également être dus à des actes de malveillance, comme un attentat. La rupture d'un ouvrage de retenue d'eau peut entraîner la formation d'une onde de submersion qui se propage à grande vitesse à l'aval ou dans les basses plaines littorales. Cette onde de submersion ayant une

hauteur et une vitesse élevées et étant chargée de matériaux issus de l'ouvrage de retenue d'eau et de matériaux d'érosion en amont, son pouvoir destructeur est élevé. Les risques économiques associés à ces événements sont ainsi très importants. Les risques humains peuvent eux aussi être très élevés, mais dépendent du délai d'alerte pour l'évacuation des populations et ainsi de l'état de surveillance des ouvrages. Il est à noter que les inondations par rupture de digues ne sont pas considérées dans toutes les études comme un type d'inondation, mais plutôt comme un facteur aggravant les inondations fluviales et côtières.

6. Les inondations subites ou éclair

Les crues subites ou éclair sont liées à des pluies orageuses très intenses, dépassant plusieurs centaines de millimètres en quelques heures et localisées sur des bassins versants de taille petite à modérée (de quelques km² à une centaine de km²) ou sur le lit des torrents à forte pente (>6%). Ces crues, dont l'apparition est soudaine, sont caractérisées par une montée des eaux très rapide (souvent inférieure à une heure), par une charge alluviale élevée et par un fort pouvoir érosif. Dans certains cas, ces inondations éclair peuvent déclencher des glissements de terrain de grande ampleur et des coulées de boues. Sur des torrents à très fortes pentes (>20%), ces crues peuvent être caractérisées de laves torrentielles. Il s'agit de masses boueuses, chargées en blocs de toutes tailles et comportant au moins autant de matériau solide que d'eau. Ces laves torrentielles peuvent atteindre des volumes considérables et une vitesse élevée, allant jusqu'à 40 km/h. Les crues éclair et les laves torrentielles ont ainsi toutes deux un pouvoir destructif important, et le risque économique qui leur est lié est très élevé. Ces inondations n'étant généralement pas prévisibles, le temps d'alerte avant l'apparition d'une crue éclair est fortement réduit, ce qui induit des risques humains élevés.

ANNEXE II

RÉSULTATS DES CLASSIFICATIONS DE L'EAU LIBRE, ET DES ZONES URBAINES ET RURALES INONDÉES, EN NOMBRE DE PIXELS

Cette seconde annexe est liée aux résultats présentés dans le Chapitre 4 de ce document, et présente les résultats des classifications de l'eau libre, puis des zones urbaines et rurales inondées, exprimés en nombre de pixels. Ces résultats permettent de montrer à partir de quelles valeurs les précisions de ces différentes classifications ont été évaluées.

Tableau A2.1: Matrice d'erreur des différentes étapes de classification de l'eau libre, exprimée en nombre de pixels, pour la date du 1^{er} mai 2011 (image RS-2 en mode Ultra-Fin)

	Nombre total de pixels	Correctement classifiés	Erreurs d'omission	Erreurs de commission
Pixels d'eau libre, image GeoEye-1	7075596	-	-	-
Classification initiale de l'eau libre	6695089	4601943	2474694	2093146
Raffinement avec degrés d'appartenance	5843193	4544981	2531656	1298212
Puis avec périodes de retour d'inondation	4562555	4511045	2565592	51510

Tableau A2.2: Matrice d'erreurs des différentes étapes de classification de l'eau libre, exprimée en nombre de pixels, pour la date du 7 mai 2011 (image RS-2 en mode Fin)

	Nombre total de pixels	Correctement classifiés	Erreurs d'omission	Erreurs de commission
Pixels d'eau libre, image IKONOS-2	27296512	-	-	-
Classification initiale de l'eau libre	26784686	24010054	3286458	2774632
Raffinement avec degrés d'appartenance	25165778	23848728	3447784	1317050
Puis avec périodes de retour d'inondation	24294301	23848728	3442680	445573

Tableau A2.3: Matrice d'erreurs de la classification des zones urbaines et rurales inondées exprimée en nombre de pixels, pour le 1^{er} mai 2011 (image RS-2 en mode Ultra-Fin)

	Nombre total de pixels	Correctement classifiés	Erreurs d'omission	Erreurs de commission
Pixels urbains inondés, image GeoEye-1	1648473	-	-	-
Pixels ruraux inondés, image GeoEye-1	2527164	-	-	-
Classification des zones urbaines inondées	1628066	1414893	233580	213173
Classification des zones rurales inondées	3334782	2450343	76821	884439

Tableau A2.4: Matrice d'erreurs de la classification des zones urbaines et rurales inondées exprimée en nombre de pixels, pour le 7 mai 2011 (image RS-2 en mode Fin)

	Nombre total de pixels	Correctement classifiés	Erreurs d'omission	Erreurs de commission
Pixels urbains inondés, image GeoEye-1	4815739	-	-	-
Pixels ruraux inondés, image GeoEye-1	16540097	-	-	-
Classification des zones urbaines inondées	4873838	4208543	605661	665295
Classification des zones rurales inondées	16549484	16132029	400191	417455

ANNEXE III

CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU DANS L'ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Cette quatrième annexe présente la cartographie des hauteurs d'eau dans l'ensemble de la zone d'étude pour la date du 1^{er} mai 2011.

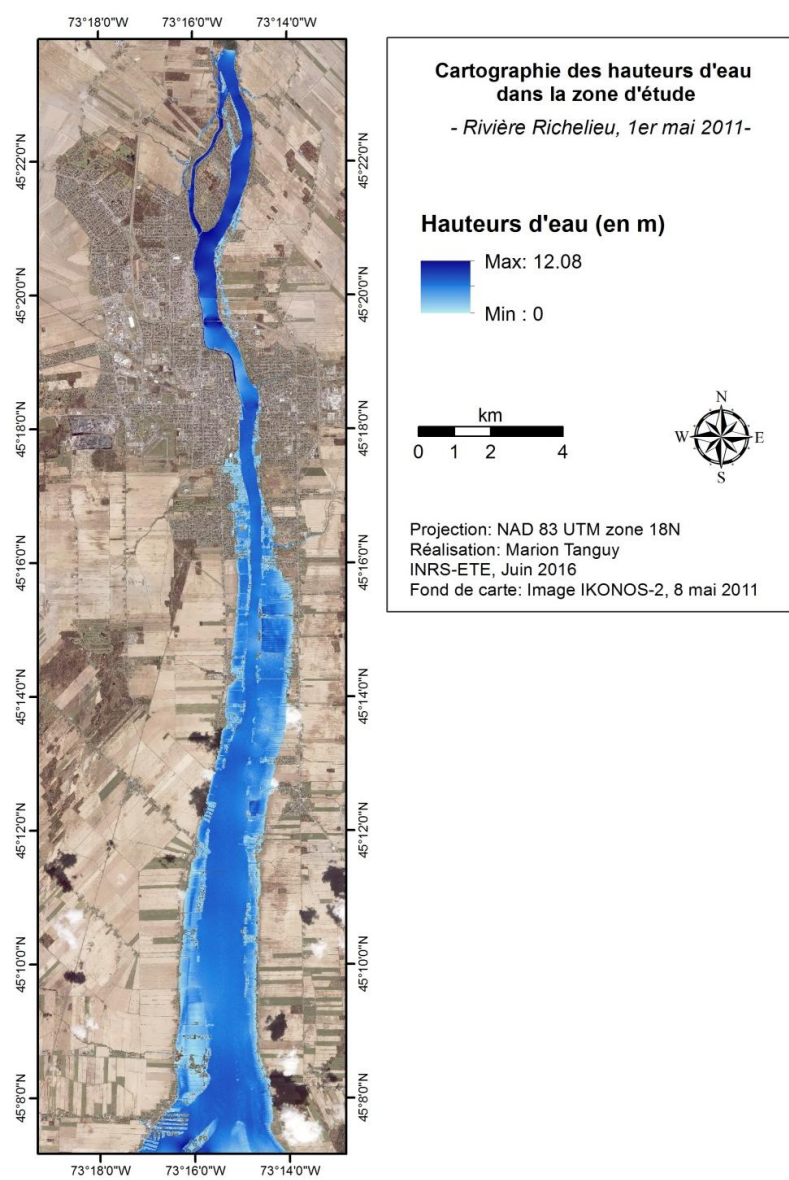


Figure A4.1: Cartographie des hauteurs d'eau dans l'ensemble de la zone inondée

ANNEXE IV

EXEMPLES D'INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER DIFFÉRENTES DIMENSIONS DE LA VULNÉRABILITÉ HUMAINE AUX ALÉAS NATURELS

Cette cinquième annexe présente un ensemble d'indicateurs de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels relevés dans la littérature, et regroupés dans le Tableau A5.1. L'objectif est de mettre en relief les différences pouvant exister entre les études en matière d'indicateurs de vulnérabilité humaine aux aléas naturels, en ciblant en particulier l'aléa inondation. Les objectifs principaux des études sélectionnées, le pays dans lequel l'analyse prend place, la phase de gestion du risque visée ainsi que l'échelle d'analyse, qui peuvent également influencer la sélection de ces indicateurs, sont également indiqués dans ce tableau.

Tableau A4.1: Exemples d'indicateurs utilisés pour évaluer différentes dimensions de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels

Dimension de la vulnérabilité	Aléa	Indicateurs	Phase gestion du risque	Échelle et pays
Cutter et al. (2000)	Objectifs: Développement d'une méthode d'estimation de la vulnérabilité des individus et des lieux à l'aide d'indicateurs sociaux et physiques			
Sociale et Physique	Multi-aléas	Population totale Nombre total d'unités d'habitations Nombre de maisons mobiles Personnes âgées de - de 18 ans Personnes âgées de + de 65 ans Personnes non blanches Valeur moyenne de la maison Valeur totale de la maison	Prévention et Intervention	Comté États-Unis
Hebb et Mortsch (2007)	Objectifs: Énoncer des mesures de réduction de la vulnérabilité de la population et de mitigation des aléas dans une perspective de changements climatiques			
Sociale et Physique	Inondations fluviales et sécheresses	Ménages mono-parentaux Personnes âgées de - de 19 ans Personnes âgées de + de 65 ans Femmes Personnes non propriétaires de leur logement Dépendance aux transports en commun Personnes ne parlant pas la langue officielle Période de construction du logement Type de bâtiment	Prévention	Aire de diffusion Canada

Tableau A4.1 (Suite): Exemples d'indicateurs utilisés pour évaluer différentes dimensions de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels

Dimension de la vulnérabilité	Aléa	Indicateurs	Phase gestion du risque	Échelle et pays
Kázmierczak et al. (2011)	Objectifs: Analyse de la vulnérabilité, de l'exposition et des caractéristiques de l'aléa inondation dans une communauté urbaine, dans le but de cibler les mesures d'adaptation nécessaires à la diminution du risque			
Sociale et Physique	Inondations pluviales	Personnes pauvres Personnes sans emploi Foyers sans voiture Foyers habitant un logement social Individus sans qualifications Minorités ethniques Personnes âgées de - de 4 ans Personnes âgées de + de 75 ans Personnes vivant seule Personnes nées hors du R-U Type de bâtiment Zones soumises aux inondations Zones fortement soumises aux inondations etc.	Prévention, gestion de crise et retour d'expérience	Aire de diffusion Royaume-Uni
Kubal et al. (2009)	Objectifs: Développement d'une approche multi-critères d'évaluation spatiale du risque d'inondation			
Sociale, Économique, Physique et Environnementale	Inondations fluviales	Bâtiments administratifs et commerciaux affectés Équipements publics affectés Nombre d'étages Valeur foncière Réseau routier Réseaux de transport Logements affectés Valeur foncière Population 0-10 ans Population 65 ans et plus Population totale Biodiversité Erosion Pollution Végétation	Prévention et gestion de crise	Grille de 10mx10m Allemagne
Montz et Evans, 2001	Objectifs: Construction d'indices de vulnérabilité sociale face aux inondation			
Sociale	Inondations éclair	Personnes âgées de - de 15 ans Personnes âgées de + de 65 ans Femmes à la tête du foyer Revenu moyen du ménage Densité de population	Prévention	Unité de recensement États-Unis
Tapsell et al. (2002)	Objectifs: Analyser les impacts sociaux et sanitaires des inondations pour mieux cibler les mesures de protection contre l'aléa			
Sociale	Inondations fluviales	Ménages mono-parentaux Personnes âgées de + de 75 ans Malades de longue durée Personnes non propriétaires de leur logement Personnes sans emploi Logement surpeuplé	Prévention	Unité de recensement Royaume-Uni

Tableau A4.1 (Suite): Exemples d'indicateurs utilisés pour évaluer différentes dimensions de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels

Dimension de la vulnérabilité	Aléa	Indicateurs	Phase gestion du risque	Échelle et pays
Schneiderbauer, 2007	Objectifs: Développer un indicateur d'évaluation de la vulnérabilité de la population à l'échelle du pays, par l'intégration d'indicateurs de vulnérabilité multi-échelles			
Sociale, économique, physique, politique	Multi-aléas (dont inondations)	Age moyen	Prévention et Intervention	Par pays en développement
		Espérance de vie		
		Taux d'illettrisme		
		Densité en population rurale		
		Niveau d'urbanisation		
		Type de gouvernement		
		Contribution du secteur primaire au PIB		
		Discrimination politique de groupes ethniques		
		Conflits intra-et inter-communautaires		
		<i>Indicateurs dépendants de l'aléa inondation</i>		
		Matériau principal du bâtiment		
		Nombre de familles par bâtiments		
		Altitude du bâtiment		
		Dégradation des sols		
Taux de déforestation				

ANNEXE V

QUESTIONNAIRES SUR LA VULNÉRABILITÉ HUMAINE À L'ALÉA INONDATION SOUMIS À DES EXPERTS DE LA SÉCURITÉ CIVILE DU QUÉBEC

Cette annexe regroupe les trois questionnaires sur les différentes composantes de la vulnérabilité humaine, ayant servi de base au développement des méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité et du risque humain liés à une inondation en cours. Ces questionnaires portent sur :

- **Questionnaire 1** : La vulnérabilité socio-économique de la population à l'aléa inondation
- **Questionnaire 2** : L'exposition de la population à l'inondation
- **Questionnaire 3** : La vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

Première Partie | Évaluation de la vulnérabilité socio-économique de la population

• Cadre de l'analyse

Cette première partie de l'atelier sollicite vos connaissances de la vulnérabilité socio-économique de la population face à l'aléa inondation.

Votre expertise sera demandée en plusieurs points :

- 1- La sélection des indicateurs permettant de caractériser la vulnérabilité socio-économique de la population,
- 2- La méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique que vous utilisez actuellement,
- 3- L'échelle d'évaluation de la vulnérabilité humaine la plus adaptée à la gestion de l'intervention,
- 4- La disponibilité des données nécessaires à une évaluation fiable de la vulnérabilité socio-économique.

1 – Sélection des indicateurs de vulnérabilité socio-économique

Le guide « *Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités*¹ » a été développé par le Ministère de la Sécurité Publique du Québec dans le but d'orienter les municipalités dans l'élaboration de leurs plans de sécurité civile. La vulnérabilité socio-économique de la population y est intégrée à travers des « catégories de population », qui permettent de différencier les personnes autonomes, des personnes semi-autonomes et des personnes alitées. Ces « catégories de population » sont les suivantes :

- Adultes
- Enfants (niveau secondaire)
- Enfants (niveau primaire)
- Enfants (niveau préscolaire)
- Personnes hospitalisées
- Personnes dans un centre d'accueil

Ce guide n'est cependant pas normatif, et une évaluation précise de la vulnérabilité socio-économique de la population face aux inondations ne peut se limiter uniquement à ces quelques « catégories de population ». L'étude d'un large ensemble de travaux portant sur l'évaluation de cet aspect de la vulnérabilité a permis de confirmer que d'autres indicateurs permettent d'affiner les profils de vulnérabilité socio-économique de la population.

Question 1. Le tableau ci-dessous présente les indicateurs de vulnérabilité intrinsèque relevés dans la littérature. Au meilleur de vos connaissances, indiquez à l'aide d'une croix les indicateurs qui permettent, selon vous, de caractériser de manière fiable la vulnérabilité socio-économique de la population face aux inondations.

	Genre (Femmes)		Personnes isolées (faibles réseaux sociaux)		Densité de population (par zone d'analyse)
	Personnes âgées (65 ans et +)		Absence d'expérience d'événements passés		Locataire du logement
	Personnes handicapées et malades de longue durée		Nombre de véhicules par ménage		Population immigrante (langue maternelle ≠ langue officielle du pays)
	Ménages monoparentaux		Taux de chômage (par zone d'analyse)		
	Foyers à faibles revenus		Faible niveau d'éducation		

¹ « Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités ». Préparé par la Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie. Ministère de la sécurité Publique, Québec. Septembre 2008, 97 pages.

Question 2. Connaissez-vous d'autres indicateurs de vulnérabilité socio-économique qui pourraient compléter de manière pertinente les indicateurs sélectionnés dans la **Question 1**?

Si oui, indiquez lesquels.

Question 3. Si cela vous semble pertinent, classez les indicateurs de vulnérabilité identifiés par le guide « **Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités** », ainsi que ceux ajoutés au cours des **Questions 1** et **2**, par ordre d'influence sur la vulnérabilité socio-économique de la population (du plus influent au moins influent)

Si plusieurs indicateurs ont une importance égale, placez-les dans une même case.

Classification des indicateurs de vulnérabilité, par ordre d'influence	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	

2 – Méthode d'évaluation de la vulnérabilité socio-économique utilisée actuellement

Question 4. Au cours de nos recherches, nous avons constaté que diverses méthodes sont utilisées pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population.

Indiquez à l'aide d'une croix la méthode que vous utilisez pour évaluer la vulnérabilité de la population face aux inondations.

A. Analyse empirique et intuitive, qui se base sur:

- et/ou** Des aspects liés à la nature du site: topographie, hydrologie, localisation en plaine inondable.
et/ou Un profil socio-économique général de la population exposée à l'aléa dans votre zone d'action
et/ou La connaissance des sinistres passés dans la zone: inondations préalables, périodes de récurrence de crues (2, 5, 20 ans etc.).

Commentaires :

B. Analyse quantitative, basée sur les caractéristiques de la population par zone d'analyse touchée par l'aléa.

1. Détermination d'une échelle d'analyse (secteur géographique, quartier, îlot etc.).
2. Définition de catégories de population (ex : adultes, enfants de niveau préscolaire, personnes handicapées etc.).
3. En phase de gestion de crise, évaluation du nombre de personnes touchées par l'aléa, par catégories population (ex : 175 adultes, 200 enfants, 55 personnes handicapées etc.).

Commentaires :

C. Analyse statistique, générant un indice de vulnérabilité intrinsèque par zone d'analyse.

1. Sélection d'indicateurs de vulnérabilité intrinsèque de la population face aux inondations, relativement aux caractéristiques démographiques, économiques et sociales du territoire.
2. Définition d'une méthode d'analyse statistique (ex : Analyse en Composantes Principales).
3. Génération d'un indice de vulnérabilité, correspondant à une échelle de vulnérabilité explicite lors de la gestion de crise (ex : échelle de 1 pour une faible vulnérabilité, à 3 pour une forte vulnérabilité).

Commentaires :

Question 5. Une des trois méthodes présentées à la **Question 4** pourrait-elle, selon vous, être plus adaptée que la méthode que vous utilisez actuellement pour évaluer la vulnérabilité socio-économique de la population face aux inondations ?

Oui Non

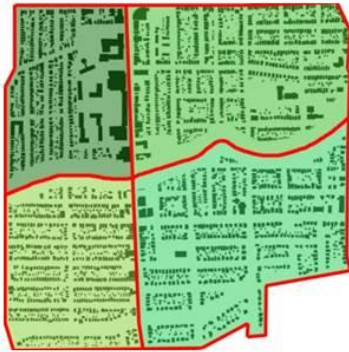
Si « *Oui* », veuillez indiquer quelle est cette méthode :

- Analyse empirique et intuitive
- Analyse quantitative
- Analyse statistique

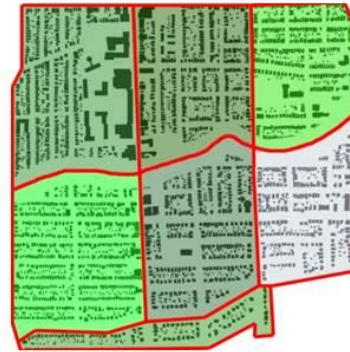
Commentaires :

3 - Échelle d'analyse de la vulnérabilité humaine

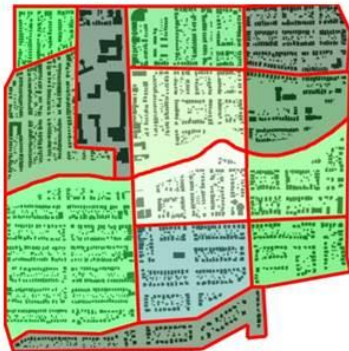
Question 6. Lors de la gestion de crise, qu'elle est l'échelle d'analyse à privilégier pour évaluer la situation en cours et les besoins liés à l'intervention?



Secteur de la ville



Groupe de quartiers



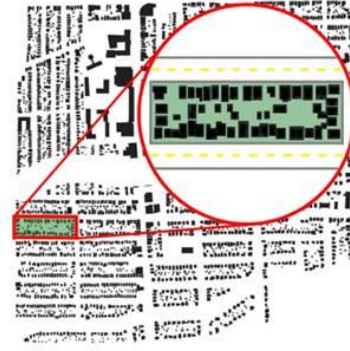
Quartier



Zone affectée par l'inondation



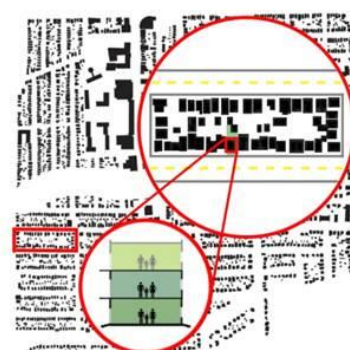
Aire de diffusion de recensement*



Îlot de diffusion de recensement **



Parcelle



Unité de logement

* L' « Aire de diffusion de recensement », utilisée par Statistique Canada, est définie comme une petite région composée de un ou de plusieurs îlots de diffusion avoisinants, et regroupant de 400 à 700 personnes. Il s'agit de la plus petite région géographique normalisée pour laquelle toutes les données du recensement sont diffusées.

** L' « îlot de diffusion », utilisé par Statistique Canada, est défini comme un territoire équivalant à un pâté de maisons dont les côtés sont délimités par des rues formant des intersections.

Question 7. Selon vous, l'échelle d'analyse à laquelle vous avez accès est-elle la plus adaptée aux besoins de la gestion de crise?

Oui Non

Si « Non », veuillez indiquer l'échelle d'analyse qui vous semble la mieux adaptée aux besoins de la gestion de crise :

4 – Sources de données

Question 8. Actuellement, l'échelle d'information la plus fine à notre disposition pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique est celle de l'aire de diffusion de Statistiques Canada, qui regroupe des données de recensement de 400 à 700 personnes.

Les municipalités et les services de la sécurité publique possèdent-ils des informations sur la population à une échelle plus fine (ex : par bâtiment, à l'échelle du foyer etc.)?

Oui Non Je ne sais pas

Si la réponse est « Oui », pouvez-vous spécifier quelles sont ces données et quelles sont leur sources?

Veuillez préciser l'échelle à laquelle ces informations détaillées sont disponibles (ex : au niveau du quartier, de l'îlot, du bâtiment, de l'unité de logement, etc.) ?

Question 9. Selon le guide « *Planifier la réponse au sinistre : Guide à l'intention des municipalités* », les Centres locaux de services communautaires (CLSC) détiennent des informations détaillées sur la population, en particulier en matière de santé. Les municipalités peuvent-elles avoir facilement accès à ces informations?

Oui Non

Seconde Partie | Évaluation de l'exposition de la population au cours de l'inondation

• Cadre de l'analyse

Cette seconde partie de l'atelier se penche sur l'exposition de la population au cours de l'inondation.

Vos connaissances seront sollicitées sur les points suivants :

- 1- Les caractéristiques des bâtiments résidentiels permettant d'évaluer l'exposition de la population au cours de l'inondation
- 2- Les caractéristiques de l'inondation influençant le niveau de risque pour les résidents des bâtiments inondés.

1- Les caractéristiques des bâtiments permettant d'évaluer l'exposition de la population au cours de l'inondation

L'analyse d'un large ensemble de travaux intégrant la notion d'exposition de la population à l'aléa inondation révèle que différentes caractéristiques des bâtiments permettent d'évaluer cet aspect de la vulnérabilité. Ces caractéristiques sont présentées ci-dessous, dans le tableau « **Caractéristiques des bâtiments résidentiels** ».

Question 1. Au meilleur de vos connaissances, indiquez à l'aide d'une croix les caractéristiques des bâtiments résidentiels présentées dans le tableau suivant qui vous semblent adaptées pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments résidentiels face aux inondations.

Si selon vous d'autres indicateurs peuvent compléter cette liste, veuillez les inscrire dans le tableau « **Autres caractéristiques** ».

Caractéristiques des bâtiments résidentiels	
<i>Date de la construction</i>	
<input type="checkbox"/>	Avant 1900
<input type="checkbox"/>	Entre 1900 et 1950
<input type="checkbox"/>	Entre 1950 et 2000
<input type="checkbox"/>	Après 2000
<i>Type de construction</i>	
<input type="checkbox"/>	Maison mobile
<input type="checkbox"/>	Chalet
<input type="checkbox"/>	Maison avec fondations
<input type="checkbox"/>	Immeuble à logements
<i>Type de matériaux</i>	
<input type="checkbox"/>	Plastique
<input type="checkbox"/>	Bois
<input type="checkbox"/>	Pierre
<input type="checkbox"/>	Béton
<input type="checkbox"/>	Acier
<i>Élévation du premier plancher</i>	
<input type="checkbox"/>	Premier plancher surélevé
<input type="checkbox"/>	Premier plancher non surélevé

Caractéristiques des bâtiments résidentiels (suite)	
<i>Nombre d'étages</i>	
<input type="checkbox"/>	Un seul étage (1 ^{er} étage)
<input type="checkbox"/>	Plus d'un étage (2 ^{ème} étage et +)
<i>Présence d'un sous-sol</i>	
<input type="checkbox"/>	Pas de sous-sol
<input type="checkbox"/>	Sous-sol non aménagé
<input type="checkbox"/>	Sous-sol aménagé

Autres caractéristiques	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	

Question 3. Au Québec, les sous-sols des bâtiments résidentiels sont souvent aménagés, et abritent des pièces de vie ou encore des équipements nécessaires à l'occupation du bâtiment (chaufferie, électricité etc.). Ainsi, en gestion de crise, l'inondation du sous-sol d'un bâtiment résidentiel est-elle considérée de la même manière que l'inondation du 1^{er} étage du bâtiment, en termes de risques pour la population?

Oui Non

L'inondation du sous-sol d'une maison rend-t-elle le bâtiment automatiquement inhabitable?

Oui Non

Cela dépend-t-il d'autres critères, tels que de la fonctionnalité des sources d'énergie et du réseau d'eau potable, de la saison etc.?

Oui Non

Si « Oui », veuillez indiquer quels sont ces critères :

2- Caractéristiques de l'inondation influençant le niveau d'exposition pour les résidents des bâtiments inondés

Question 4. Selon votre expertise, sélectionnez la ou les caractéristiques de l'inondation des bâtiments résidentiels influençant l'exposition des résidents des bâtiments inondés.

- La simple présence d'eau dans le bâtiment, quelle que soit la hauteur d'eau.
- La hauteur d'eau dans le bâtiment.
- La durée de l'inondation du bâtiment.
- La vitesse des flots.
- Le moment auquel l'inondation se produit (jour/nuit).
- Autres : précisez _____

Commentaires :

Question 5. Classez les caractéristiques de l'inondation des bâtiments résidentiels par ordre d'importance, de celle qui, combinée à la vulnérabilité du bâti, influence **le plus** l'exposition de la population à celle influençant **le moins** son exposition.

A noter que deux caractéristiques peuvent avoir la même importance.

Classification des caractéristiques de l'inondation, par ordre d'importance sur l'exposition	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Question 6. Selon votre expertise, certaines hauteurs d'eau dans un bâtiment résidentiel sont-elles associées à des risques particuliers pour les résidents?

Ex : ½ pouce d'eau dans le bâtiment n'est pas significatif; 1 pied d'eau peut atteindre les prises électriques et peut ainsi remettre en question la sécurité des occupants du bâtiment; 4 pieds d'eau peuvent rendre instable la structure du bâtiment et constituent un risque majeur pour les occupants.

Oui Non

Si « Oui », veuillez spécifier dans le tableau présenté à la page suivante quelles sont ces hauteurs d'eau (au premier plancher et au sous-sol), quels peuvent être les risques associés pour les résidents et quels sont leurs impacts en termes de gestion de crise.

Hauteur d'eau au premier plancher (rdc)	Risques induits pour les résidents	Impacts en termes de gestion de crise
Hauteur d'eau dans le sous-sol	Risques induits pour les résidents	Impacts en termes de gestion de crise

Question 7 : De la même manière, si la durée de l'inondation est considérée comme un facteur d'exposition important, existe-t-il des paliers temporels (ex : 1 journée, 2 journées, 1 semaine) induisant un risque accru pour le bâtiment et ainsi pour ses résidents?

Oui Non

Si « Oui », veuillez spécifier dans le tableau suivant quelles sont les paliers temporels induisant un risque accru pour les bâtiments et quels sont ces impacts potentiels en matière de gestion de crise?

Palier de temps	Risques induits pour les résidents	Impact en termes de gestion de crise

Infrastructures de gestion de crise	Importance
Organisation de la gestion de crise et de sécurité	
Hôtel de ville (coordination des mesures d'urgence)	
Caserne de pompiers	
Poste de police	
Information et technologies de communication	
Infrastructures énergétiques (postes de transformation, poste essence etc.)	
Transport d'énergie	
Centre de communication d'urgence 911	
Centres et réseaux téléphoniques	
Centres et réseaux télégraphiques	
Centres et réseaux de radiodiffusion	
Centres et réseaux de télévision	
Centres et réseaux internet	
Tour de communication	
Transport	
Infrastructures pour des véhicules à moteur (stations et gares)	
Segments de réseau routier	
Segments de réseau routier d'urgence	
Ponts	

Infrastructures fournissant des services de base à la population	Importance
Réseaux de support à la vie	
Usine de filtration	
Infrastructure d'aqueduc	
Réservoir d'eau potable	
Pompes et prise publique d'eau	
Infrastructures énergétiques (postes de transformation, poste essence etc.)	
Transport d'énergie	
Barrages (génération d'électricité)	
Usine de traitement des eaux usées	
Infrastructure d'égouts	
Institutions de santé	
Hôpital	
Unité de chirurgie et cliniques spécialisées	
Centre d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD)	
Centre de local de services communautaires (CLSC)	
Alimentation	
industrie d'aliments et de boissons	
Commerces et détaillants d'aliments et de boissons	
Transport	
Segments de réseau routier	
Ponts	

Autres infrastructure essentielles	Importance
Institutions d'enseignement	
École maternelle	
École primaire	
École secondaire	
École polyvalente, CÉGEP, université	
Garderie	
Pouponnière, garderie de nuit	
Institutions de santé	
Maison pour personnes en difficultés	
Centre d'accueil	
Autres centres et services sociaux	
Armée	
Défense civile (établissement militaire)	
Ordre public et Sécurité	
Centres de détention et prisons	
Transport	
Infrastructure ferroviaire (stations et gares)	
Segment de réseau ferroviaire	
Métro	
Infrastructure aérienne (aéroports et aéroports)	
Infrastructure maritime (quais et traversiers)	
Routes navigables	
Production gazière et pétrolière	
Raffinerie de gaz	
Stockage de gaz	
Raffinerie de pétrole	
Stockage de pétrole	
Industrie à conséquences environnementales	
Industrie chimique, substances dangereuses	
Industrie de produits du pétrole et du charbon	
Récupération et triage de matières polluantes	
Industrie nucléaire (recherche, usine, résidus)	
Institutions financières	
Services et structures privées de paiement	
Finances publiques	

Tableau 1 : Liste des infrastructures essentielles, par catégories (d'après Robert et al. 2001¹).

Question 2. Nous aimerions savoir quelles sont les infrastructures essentielles considérées comme les plus importantes au sein de chaque catégorie.

A l'aide du barème suivant, indiquez dans le **Tableau 1** l'importance qui peut être donnée à chaque infrastructure au sein de sa catégorie.

- 1 = Très important
- 2 = Important
- 3 = Moins important

¹ Robert et al, 2003. Automatisation de la planification des mesures d'urgence pour les municipalités à risque d'inondation. Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile. 49 pages

Question 3. Certaines infrastructures ou ensembles d'infrastructures essentielles (ex : institutions de santé, transports) sont-elles mal classées?

Oui Non

Si « *Oui* », indiquez dans le tableau suivant quelles sont ces infrastructures, dans quelles catégories elles devraient être classées, mais aussi quel est leur importance au sein de leur catégorie (d'après le barème présenté à la page 9).

Infrastructures essentielles	Nouvelle catégorie d'infrastructures	Importance

Question 4. Selon vous, certaines infrastructures essentielles ont-elles été oubliées?

Oui Non

Si « *Oui* », indiquez dans le tableau suivant quelles sont ces infrastructures, quel est leur catégorie et quel est leur importance au sein de chaque catégorie.

Infrastructures essentielles	Nouvelle catégorie d'infrastructure	Importance

2- Niveaux et conditions de fonctionnement des infrastructures essentielles.

Plusieurs études évaluent le niveau de fonctionnement des infrastructures essentielles lors d'une inondation à l'aide de l'échelle à 4 niveaux suivante :

Fonctionnel : élément non touché par l'inondation.

Défaillance : élément peu touché mais les activités sont perturbées.

Non-fonctionnel : élément rendu inactif par l'inondation.

Destruction : élément partiellement ou totalement détruit par l'inondation.

Question 5. Cette classification des niveaux de fonctionnement des infrastructures essentielles vous semble-t-elle pertinente ?

Oui

Non

Si « Non », indiquez pourquoi :

Question 6. Une classification de type « fonctionnelle/non fonctionnelle » vous semblerait-elle plus appropriée?

Oui

Non

Justifiez votre réponse :

Question 7. Si vous avez répondu « Oui » à la **Question 6**, doit-on alors considérer qu'une infrastructure inondée est « non-fonctionnelle » ou sera dépend-t'il de la hauteur d'eau dans l'infrastructure? Indiquez votre réponse à l'aide d'une croix dans le tableau ci-dessous.

Une infrastructure inondée est automatiquement une infrastructure non-fonctionnelle	
Cela dépend de la hauteur d'eau dans l'infrastructure	

3- Submersion du réseau routier

Les réseaux routiers ont un rôle important lors d'une inondation. Leur submersion peut provoquer l'isolement de bâtiments et d'individus, peut retarder de manière importante les secours ou encore rendre difficile la définition d'itinéraires d'évacuation. Ainsi, ces infrastructures doivent être prises en compte de manière spécifique.

Question 8. A partir de quelle hauteur d'eau (en cm) sur la chaussée une route doit-elle être fermée à la circulation publique?

	cm
--	----

Question 9. A partir de quelle hauteur d'eau (en cm) sur la chaussée une route n'est-elle plus accessible aux véhicules de secours (type véhicules à hautes roues) ?

	cm
--	----

Question 10. Considérez-vous que l'isolement induit par l'inondation des routes fasse augmenter de manière importante la vulnérabilité de la population ?

Oui

Non

Justifiez votre réponse :

Question 11. Lors d'une inondation, des routes peuvent être inondées et certains bâtiments non inondés peuvent se trouver isolés. Comment ces zones non inondées mais isolées par l'inondation sont-elles prises en compte dans la gestion de crise et quelles sont les actions déployées?

Réponse :

4 - Absence d'approvisionnement des ressources essentielles

Le tableau suivant (**Tableau 2**) regroupe les ressources considérées comme étant essentielles pour le bien-être et la sécurité de la population, et cela en tout temps. Le manque d'une ou de plusieurs de ces ressources, causées par l'inondation des infrastructures essentielles qui les produisent, peut avoir des effets importants sur le bien-être et la sécurité de la population et qui s'aggravent dans le temps.

Question 12. Dans le **Tableau 2**, classez les ressources essentielles présentées, de celle dont l'absence a **le plus** de conséquences sur le bien-être, la santé et la sécurité de la population lors d'une inondation, à celle dont l'absence a **le moins** de conséquences.

Si certaines ressources ont été oubliées, inscrivez-les dans les cases vides prévues à cet effet.

Question 13. Enfin, au meilleur de vos connaissances, indiquez dans la case « Absence critique après ... (en h) » le palier de temps **en heures** après lequel l'absence de chaque ressource devient critique pour la santé et la sécurité de la population.

Ex : Après 24h, l'absence d'approvisionnement en eau potable devient critique pour la santé et la sécurité de la population.

Ressources essentielles	Classification des ressources essentielles	Absence critique après... (en h)	Commentaires
Électricité			
Eau courante			
Eau potable			
Nourriture			
Égouts			
Sanitaires			
Chauffage			
Téléphone			
Accès Internet			
Réseaux de transport			

Tableau 2 : Classification des ressources essentielles selon leur importance pour la santé et la sécurité de la population.