

CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'INONDATION EN MILIEU URBAIN ADAPTÉE À LA GESTION DE CRISE ANALYSE PRÉLIMINAIRE

Présenté à :

Direction de la sécurité civile
Ministère de la Sécurité publique du Québec

Par

Marion TANGUY

Dans le cadre de son examen doctoral pour l'obtention
du doctorat en Sciences de l'eau

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9

Rapport de recherche R1395

Version finale : Lundi 26 novembre 2012

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Notions de base relatives à la gestion du risque d'inondation	3
1.3.1 Risque : Aléa et Vulnérabilité	3
1.3.2 La gestion du risque d'inondation.....	4
1.3.3 Inondations à cinétique lente et inondations à cinétique rapide.....	5
1.4 Objectif principal et objectifs spécifiques.....	6
1.4.1 Objectif principal	6
1.4.2 Objectifs spécifiques	7
1.5 Contenu du rapport	8
2 PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES	9
2.1 Présentation du site d'étude.....	9
2.2 Présentation des données	10
3 CARACTÉRISATION DE L'ALÉA INONDATION	13
3.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation.....	13
3.1.1 Les relevés sur le terrain.....	13
3.1.2 La modélisation hydraulique	14
3.1.3 La télédétection	14
3.1.4 La télédétection radar	16
3.2 Principes de télédétection radar.....	18
3.2.1 Physique du signal.....	18
3.2.2 Longueur d'onde des systèmes RSO.....	18
3.2.3 La polarisation	19
3.2.4 L'angle d'incidence	20
3.2.5 Les systèmes radar à synthèse d'ouverture	20
3.3 Interaction du signal radar avec les plans d'eau.....	22
3.3.1 Plans d'eau libre et champs inondés.....	22

3.3.2	Végétation et zones boisées inondées.....	23
3.3.3	Zones urbaines inondées.....	24
3.4	Analyse des méthodologies de caractérisation de l'aléa inondation à l'aide de l'imagerie radar satellitaire	26
3.4.1	Milieu urbain et milieu rural	26
3.4.2	Capteurs et données utilisées pour la détection des zones inondées	26
3.4.3	Techniques de traitement de l'image pour la détection et la délimitation des zones inondées.....	28
3.4.4	Méthodologies non adaptées au contexte de gestion de crise	28
3.4.5	Intérêt des approches orientées objet	30
3.4.6	Intégration des paramètres hydrauliques	32
3.4.7	Estimation des hauteurs d'eau	34
3.4.8	Prise en compte des effets géométriques en zone urbaine	36
3.5	Méthodologie de caractérisation de l'aléa inondation	36
3.5.1	Création de la fonction niveau-débit pour la zone d'étude	40
3.5.2	Premier niveau de classification.....	40
3.5.3	Délimitation de la plaine inondée minimale	42
3.5.4	Création de la bibliothèque de rétrodiffusions	43
3.5.5	Second niveau de classification	44
3.5.6	Affinement de la classification	44
3.5.7	Extraction des niveaux d'eau en tout point de la zone inondée	45
4	CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA POPULATION AUX INONDATIONS	47
4.1	Concepts relatifs à la vulnérabilité de la population aux inondations	47
4.1.1	Définition et conceptualisation de la vulnérabilité	47
4.1.2	Un manque d'analyses orientées vers la gestion de crise	49
4.1.3	Études intégrées de la vulnérabilité	50
4.1.4	Sélection des indicateurs de vulnérabilité sociale	50
4.1.5	L'importance de l'échelle d'analyse.....	51
4.1.6	Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles.....	52
4.1.7	La vulnérabilité du bâti	53
4.2	Méthodologies d'évaluation des différentes dimensions de la vulnérabilité de la population aux inondations.....	54
4.2.1	Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque	55
4.2.2	Évaluation de la vulnérabilité du bâti.....	58
4.2.3	Évaluation de la vulnérabilité structurelle	59

4.2.4	Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations	63
5	CONCLUSION.....	65
6	ÉCHÉANCIER	69
7	RÉFÉRENCES	71
	ANNEXES.....	81
ANNEXE 1	PRÉSENTATION DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION DISPONIBLES.....	83
ANNEXE 2	INFRASTRUCTURES ESSENTIELLES PAR SECTEUR ET SOUS-SECTEURS	89
ANNEXE 3	QUESTIONNAIRE CRÉÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ INTRINSÈQUE.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Bandes spectrales, plages de fréquences et longueurs d'ondes utilisées par les capteurs Radar (Henry, 2004)	19
Tableau 2	Caractéristiques des capteurs radar cités dans l'étude	21
Tableau 3	Niveau de vulnérabilité indirecte de la population selon les infrastructures essentielles touchées	62
Tableau 4	Échéancier proposé pour la réalisation du projet de doctorat.....	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Étendue de la zone inondée (tons bleu foncé) le 11 Mai 2011 (Image EO-1 ALI, NASA) et limites de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu (en rouge).....	11
Figure 2	Niveau d'eau (Station Marina St-Jean-sur-Richelieu) notamment lors des dates d'acquisition des images	12
Figure 3	Mécanismes et intensité de rétrodiffusion des surfaces inondées et des surfaces sèches (d'après Schumann et al. (2012)).....	25
Figure 4	Organigramme méthodologique de caractérisation de l'aléa inondation.....	39
Figure 5	Caractéristiques de l'aléa et de la vulnérabilité retenues pour cette étude.....	54
Figure 6	Vue schématique des méthodologies d'évaluation des différents aspects de la vulnérabilité humaine	55
Figure 7	Indicateurs de vulnérabilité socio-économique relevés dans la littérature.....	56
Figure 8	Vulnérabilités des infrastructures essentielles (Bouchon, 2006).....	59
Figure 9	Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations	64
Figure 10	Exemple de résultats produits par l'outil de caractérisation et d'évaluation du risque d'inondation en milieu urbain	66

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les inondations sont, de toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année, les plus fréquentes, les plus dommageables et les plus mortelles (Pulvirenti et al., 2011b). Elles sont la source de près de la moitié des décès occasionnés par les catastrophes naturelles au cours des 50 dernières années, et sont responsables de près du tiers des pertes économiques au niveau mondial (James, 2008).

Si l'impact des inondations en termes de dommages et de pertes en vies humaines est plus important dans les pays en voie de développement du fait d'une vulnérabilité humaine et économique plus élevée, une province comme le Québec se trouve elle aussi régulièrement en proie à ce type de phénomène. Entre 1990 et 2010, 27 inondations qualifiées de catastrophiques ont ainsi touché le Québec. 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. À ces phénomènes d'envergure s'ajoutent les inondations hivernales, causées par les embâcles et les débâcles de glace de rivière, de moindre intensité mais néanmoins récurrentes.

Si les tendances aux changements climatiques, combinées à l'augmentation de la population vivant sur les terres inondables, à la déforestation, à la disparition des terrains marécageux et à l'augmentation du niveau moyen des mers, se confirment dans les décennies à venir, les inondations catastrophiques devraient être plus fréquentes (IPCC, 2012). Un nombre croissant d'individus devraient donc être exposés à ce phénomène, ce qui rend la question de la gestion du risque d'inondation de plus en plus importante pour les gouvernements et pour les municipalités.

1.2 Problématique

Depuis de nombreuses années, les efforts consentis par les organismes gouvernementaux et municipaux en matière de gestion du risque d'inondation se sont concentrés sur la promotion d'une culture d'atténuation des risques, de gestion et de préparation aux catastrophes. Un outil tel que le système GéoConférence, mis en place au Québec en 2004 par le programme GeolInnovation du secrétariat Géoconnexions de Ressource Naturelles Canada, a par exemple été développé pour aider à la concertation des responsables en sécurité civile et à l'organisation efficace des secours lors des sinistres. Ce type de système doit, afin d'être efficace, se baser sur des informations fiables et précises sur l'étendue du sinistre et sur la vulnérabilité de la population face à ce sinistre. Or, à l'heure actuelle, de nombreuses limites existent encore en matière de caractérisation de l'aléa inondation et d'évaluation de la vulnérabilité des populations face à cet aléa.

Tout d'abord, la télédétection radar satellitaire, qui est considérée comme l'outil le plus performant pour la génération d'informations spatiales indispensables à la gestion du risque, n'est pas encore pleinement exploitée. En effet, la majorité des études mettant à profit les capacités de cet outil pour la détection des zones inondées se sont jusque-là concentrées sur la détection des inondations en milieu rural (Calabresi, 1996; Oberstadler et al., 1997; Pellizzeri et al., 2003; Townsend et Walsh, 1998). Ainsi, les algorithmes développés manquent encore de fiabilité dans les milieux urbains, où les enjeux humains et économiques sont pourtant plus importants, et ne permettent pas d'évaluer l'ampleur réelle de l'aléa, ni son évolution.

De plus, la plupart des méthodes actuelles d'analyse du risque lié aux inondations se limitent à la cartographie de l'aléa lui-même, et ne prennent pas en compte les aspects sociaux et économiques de la vulnérabilité, qui sont eux aussi des composantes importantes du risque. Les fonctions reliant les dommages matériels potentiels que pourraient subir les bâtiments selon la profondeur de submersion de l'inondation sont privilégiées, et les outils créés s'adressent davantage aux assureurs qu'aux gestionnaires du territoire ou à une réelle planification des mesures d'urgence. De ce fait, aucun modèle conceptuel de formalisation de l'évaluation de la vulnérabilité n'a pour le moment été développé.

Ainsi, les outils de cartographie du risque d'inondation en milieu urbain offerts comme soutien spécifique à l'optimisation des procédures de planification et d'implantation des mesures d'urgence visant à réduire les impacts d'une inondation en cours sur la population, sont encore peu développés et sont rarement opérationnels en phase de gestion de crise.

1.3 Notions de base relatives à la gestion du risque d'inondation

1.3.1 Risque : Aléa et Vulnérabilité

Le risque, l'aléa, la vulnérabilité sont les notions centrales de cette étude. Leurs définitions étant variables selon les domaines d'expertise (sécurité civile, ingénierie, assurances, etc.), les auteurs ou les études (Schneiderbauer et Ehrlich, 2004), il est nécessaire de leur donner une définition précise dans un contexte de sécurité civile.

La *vulnérabilité* représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (Morin, 2008).

L'*aléa* constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (Morin, 2008).

Enfin, le *risque* est le résultat de l'interaction entre un aléa et la vulnérabilité des éléments exposés à son égard. Il correspond ainsi à la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (Morin, 2008). Les pertes peuvent être estimées en termes de vies humaines, de destruction d'infrastructures ou en termes financiers (UNDRO, 1979).

Ainsi, une inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée, aucun élément vulnérable n'y étant en théorie présent en termes de sécurité civile. Si au contraire elle touche une zone densément peuplée, où des infrastructures importantes sont implantées, le risque sera présent et pourra être fort (Cutter et al., 2003).

La capacité qu'a un aléa à causer des dommages résulte donc de ses caractéristiques propres, mais aussi des caractéristiques du milieu touché. Une analyse complète et fiable du risque lié aux inondations ne peut donc s'affranchir d'un de ces deux éléments, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, et doit intégrer de manière précise l'ensemble de leurs caractéristiques (Morin, 2008; Peduzzi et al., 2009).

Dans le cas de l'aléa inondation, ces caractéristiques varient selon les études. La vitesse des flots, la hauteur de l'eau, la durée de l'inondation, la température de l'eau, l'étendue de l'inondation ou encore la concentration en sédiments peuvent être considérés (Jonkman, 2005; Zhai et al., 2006). Nous avons choisi de n'utiliser que les trois caractéristiques qui, selon nous, sont les plus susceptibles d'influencer la vulnérabilité : l'étendue spatiale de l'inondation, la hauteur d'eau dans les zones submergées et la durée de l'inondation. La vulnérabilité sera quant à elle caractérisée à l'aide de trois dimensions principales : la vulnérabilité intrinsèque, la vulnérabilité du bâti et la vulnérabilité des infrastructures essentielles. Ces trois dimensions seront détaillées dans la quatrième partie du document.

1.3.2 La gestion du risque d'inondation

La gestion du risque lié aux inondations se décompose en trois volets: le volet de prévention et d'atténuation, le volet de gestion de crise et le volet de retour d'expérience.

Le volet de prévention et d'atténuation prend appui sur la connaissance et la localisation des zones à risque, et vise à réduire les vulnérabilités humaine et économique, en protégeant l'existant, en informant la population ou encore en limitant l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. Elle est basée, tout comme la phase de retour d'expérience, sur l'analyse des crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque à long terme (Hostache et al., 2005).

La phase de gestion de crise correspond quant à elle à des actions en état d'urgence, et comporte donc une contrainte temporelle importante. Une des préoccupations majeures est alors de connaître dans les délais les plus brefs l'ampleur précise de l'inondation mais aussi la localisation des populations les plus vulnérables. L'objectif est de déployer rapidement les moyens d'actions et de secours les plus appropriés et ainsi de réduire les conséquences humaines et matérielles du sinistre (Henry, 2004).

Enfin, la phase de retour d'expérience cherche à tirer des conclusions sur les conséquences de l'inondation, à en mesurer les impacts humains et économiques mais aussi à analyser la pertinence des moyens déployés lors de la phase de gestion de crise. Cette phase permet de bâtir ou d'améliorer les politiques de prévention du risque et de protection des éléments vulnérables face à une inondation future (Hostache et al., 2009).

1.3.3 Inondations à cinétique lente et inondations à cinétique rapide

Dans le cadre de cette étude, il est important de distinguer deux types de crues, dont les dynamiques, la gestion et les conséquences sont distinctes. Il s'agit des inondations à cinétique lente et des inondations à cinétique rapide.

Les inondations à cinétique lente concernent le plus souvent des bassins versants moyens à grands, dont la superficie peut aller de 15 000 à 100 000 km². Elles sont causées par des précipitations sous forme de pluies ou de neige successives et prolongées saturant les sols, et se caractérisent par une montée des eaux et une décrue lentes et progressives, de l'ordre de la journée ou plus. Les durées de submersion sont ainsi longues, et les quantités d'eau écoulées sont importantes (de centaines de millions à plusieurs milliards de m³ d'eau). Ces inondations n'étant pas violentes, le risque direct pour la population est relativement limité lors de l'inondation, mais le coût des dommages liés à la durée de submersion est élevé. Ces inondations sont aussi désignées sous le terme d'inondations fluviales ou d'inondations de plaine.

Les inondations à cinétique rapide, ou inondation éclair, concernent quant à elles des bassins versants très réactifs, souvent de petite superficie, ayant une dimension allant de quelques km² à une centaine de km², ou encore le lit de torrents à forte pente (> 6°). Elles sont le plus souvent dues à des pluies orageuses extrêmes localisées sur des surfaces petites à moyennes (jusqu'à quelques centaines de km² pour des temps de réaction du bassin versant de l'ordre de quelques heures), et se caractérisent par une montée des eaux rapide, d'une durée souvent inférieure à 1 heure, par une charge alluviale élevée et par un fort pouvoir érosif et destructif. Le risque humain et économique est alors très élevé, car le temps d'alerte est souvent très limité et l'évacuation est difficile.

L'échelle temporelle du risque n'est ainsi pas la même en cas d'inondation lente et d'inondation éclair. Lors d'une inondation éclair, la gestion de crise se fait sur le court terme : les dégâts humains et matériels sont importants dès les premiers instants de l'inondation et le risque est aussitôt élevé. Dans ce contexte, les mécanismes d'alerte et de prévention sont les plus adaptés à la réduction des dégâts humains et matériels. Différemment, dans le cas des inondations lentes, la gestion de crise s'inscrit sur le long terme : les dégâts humains et matériels sont peu élevés dans les premiers temps de l'inondation, mais le risque croît avec la durée de l'inondation et la profondeur de submersion. L'apport d'un outil permettant de spatialiser le risque en temps quasi-réel devient alors pertinent. Un cas concret de ce type d'inondation est survenu au printemps 2011 dans le bassin versant de la rivière Richelieu au Québec et dans l'état de New-York (Environnement Canada, 2011; GéoInfo, 2011; CyberPresse.ca, 2011). Le retour d'expérience fait par la Sécurité publique du Québec (Serge Légaré, Nicolas Gignac, communications personnelles) a fait ressortir les limites des outils actuels et a souligné le besoin de développer un outil opérationnel de cartographie en temps quasi-réel du risque d'inondation en milieu urbain qui puisse soutenir la gestion des mesures d'urgence et ainsi réduire les impacts humains des inondations.

1.4 Objectif principal et objectifs spécifiques

1.4.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette thèse est de développer une méthode de cartographie du risque pour la population lié aux inondations en milieu urbain, adaptée au contexte de la gestion de crise.

Trois volets sont considérés :

1. Le développement d'une méthode de caractérisation spatiale de l'aléa inondation, permettant de déterminer avec précision l'étendue des zones inondées au niveau intra-urbain ainsi que la hauteur d'eau en tout point de ces zones.
2. Le développement d'une méthode de formalisation et d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations, permettant une analyse de la vulnérabilité à l'échelle du foyer.

3. Une étude de cas, qui permettra d'évaluer la faisabilité de la méthode intégrée de cartographie en temps quasi-réel du risque pour la population lié aux inondations. Cette dernière étape permettra de tester et de valider les approches méthodologiques développées à partir d'un cas réel.

1.4.2 Objectifs spécifiques

Afin de répondre à l'objectif principal qui vient d'être énoncé, les objectifs spécifiques suivants devront être atteints :

- 1) Caractérisation de l'aléa inondation
 - a) Améliorer la délimitation des zones inondées à l'aide de l'imagerie RADARSAT-2, en vue de son intégration dans un outil d'évaluation en temps quasi-réel du risque humain lié aux inondations en milieu urbain;
 - i) Définir les paramètres d'acquisition optimaux pour la détection et la délimitation des zones urbaines inondées à l'aide de l'imagerie RADARSAT-2 en termes de polarisation, d'angle d'incidence et de résolution spatiale;
 - ii) Valider la pertinence de l'intégration des paramètres hydrauliques (relations niveaux-débits) dans la méthodologie de détection des zones inondées;
 - b) Calculer les profondeurs de submersion en tout point de la zone inondée, avec une précision centimétrique.
- 2) Formalisation et évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations
 - a) Définir les besoins en termes d'évaluation de la vulnérabilité de la population lors d'une inondation en milieu urbain, en phase de gestion de crise;
 - b) Développer des indicateurs de vulnérabilité adaptés à la gestion de crise;
 - c) Formaliser l'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations en milieu urbain.

Il s'agit d'intégrer les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations et la méthodologie de caractérisation de l'aléa inondation en milieu urbain développée dans cette étude au sein d'un même outil.

Pour développer et tester cet outil, l'ensemble des données de terrain et des données géomatiques (images satellitaires, données cartographiques, données hydrologiques, etc.) acquises durant les deux mois qu'a duré l'inondation du printemps 2011

dans le bassin versant de la rivière Richelieu — tout particulièrement au niveau de la ville de St-Jean-sur-Richelieu, en Montérégie — a été mis à notre disposition par le ministère de la Sécurité publique du Québec.

1.5 Contenu du rapport

Ce document s'articule autour de trois parties.

Tout d'abord, le site d'étude sur lequel les approches méthodologiques seront évaluées sera présenté, ainsi que l'ensemble des données mises à disposition par le Ministère de la Sécurité Publique pour cette étude.

La seconde traite de la caractérisation spatiale de l'aléa inondation. Il y sera fait état des avantages et des limites de la télédétection radar à synthèse d'ouverture pour la détection des zones inondées, ainsi que des interactions existant entre l'onde radar et les différents milieux inondés. Les remarques issues de la revue de littérature seront ensuite présentées. Enfin, une méthodologie de caractérisation spatiale de l'aléa inondation sera proposée.

La troisième partie de l'étude est consacrée à la caractérisation de la vulnérabilité aux inondations. Il y sera fait état des besoins actuels en matière d'analyse de la vulnérabilité humaine aux inondations, des différents aspects à prendre en compte pour une analyse fiable de la vulnérabilité, ainsi que de leurs méthodologies d'évaluation spécifiques. La présentation d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations conclura cette partie.

Une conclusion présentera les résultats attendus, ainsi qu'un échéancier des travaux prévus jusqu'à la fin de 2014.

2 PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES

Cette seconde partie présente les caractéristiques du site d'étude sur lequel les approches méthodologiques seront évaluées et validées, ainsi que l'ensemble des données mises à disposition par le Ministère de la Sécurité Publique, qui est partenaire de cette étude.

2.1 Présentation du site d'étude

Le site d'étude est celui de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, située au sud du Québec, dans la région administrative de la Montérégie. Cette municipalité de 92 394 habitants s'est développée sur les rives de la rivière Richelieu, dans les basses-terres du Saint-Laurent. La zone d'étude se caractérise donc par un très faible dénivelé. L'occupation du sol de la municipalité est à dominante rurale, avec 57 % des sols occupés par des activités agricoles ou de cultures et 8 % occupés par des forêts. Les zones urbaines, situées de part et d'autre de la rivière, occupent 35 % de la zone d'étude.

La rivière Richelieu a connu, de la fin avril à la fin juin 2011, une inondation majeure. Cette inondation a été la première d'une telle envergure depuis l'enregistrement de données hydrométriques sur la rivière Richelieu, soit depuis plus de 150 ans. Elle a ainsi largement dépassé les niveaux de crue centennale établis par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ), occasionnant l'inondation de plus de 3 000 résidences, l'évacuation de près de 1 000 personnes, la fermeture d'écoles, de routes et de ponts, etc. (Quebecgeographique 2011). L'inondation a surpris par son intensité — de nombreuses zones n'ayant jamais été inondées ont été touchées — mais aussi par sa durée exceptionnellement longue, de près de deux mois. Au maximum de la crue, les zones touchées s'étendaient du lac Champlain jusqu'à la ville de Beloeil, s'inscrivant ainsi dans un rectangle de 65 km (du Nord au Sud) par 22 km (d'Est en Ouest) (Figure 1).

À Saint-Jean-sur-Richelieu, deux types de zones ont été particulièrement touchées. Ces zones, situées en grande partie en amont du centre-ville, sont des zones boisées et des zones résidentielles, dont certaines sont entourées d'arbres. Au total, ce sont presque 500 maisons qui ont été inondées dans la municipalité.

2.2 Présentation des données

L'inondation de la rivière Richelieu ayant duré près de deux mois — entre fin avril et fin juin 2011 —, il a été possible pour le Centre Canadien de Télédétection de planifier l'acquisition d'un grand nombre d'images RADARSAT-2 en double polarisation (HH-HV) sur une zone s'étendant du lac Champlain jusqu'à la ville de Sorel-Tracy. Ainsi, 33 images ont pu être acquises entre le 5 mai et le 6 juillet 2011, selon différents modes d'acquisition (Fin et Standard), différents angles d'incidence et différentes orbites. Une série d'images RADARSAT-2 en polarisation simple HH a également pu être acquise le 1^{er} mai 2011, en mode Ultra Fin. Les images ayant été acquises sur une période de près de deux mois, et ce dès la première semaine de l'inondation, nous avons donc à disposition des images correspondant aux pics de crues, permettant également de nous renseigner sur la dynamique spatio-temporelle de l'inondation (Figure 2). Ces données sont complétées par des images optiques issues des capteurs GeoEye (1^{er} mai), WorldView (1^{er} mai) et Ikonos (8 mai) et par des images dans le proche infrarouge, issues du capteur EO-1 ALI (11 mai). Elles seront mises à profit lors des phases de validation des méthodologies. L'ensemble des données satellitaires est détaillé dans l'Annexe 1.

Au niveau des données topographiques, nous disposons de données LIDAR d'une résolution horizontale et verticale de 5 mètres et de contours topographiques au 1 mètre, couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Ces données ont également été fournies par le Ministère de la Sécurité Publique du Québec. Pour la suite des travaux, il pourrait s'avérer nécessaire d'obtenir des données topographiques à une résolution spatiale plus fine, de l'ordre de 1 ou 2 mètres.

Les données de niveau et de débit relatives aux cotes de crue de référence 2 ans, 20 ans et 100 ans ont également été produites pour la zone d'étude dans le cadre du Plan de Détermination des Cotes de Crues de récurrences PDCC, et sont disponibles sous forme vectorielle. Ces données sont accessibles sur le site internet Geoboutique, du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. Enfin, nous disposons de fichiers vectoriels de l'occupation du sol pour toute la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu.



Figure 1 Étendue de la zone inondée (tons bleu foncé) le 11 Mai 2011 (Image EO-1 ALI, NASA) et limites de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu (en rouge)

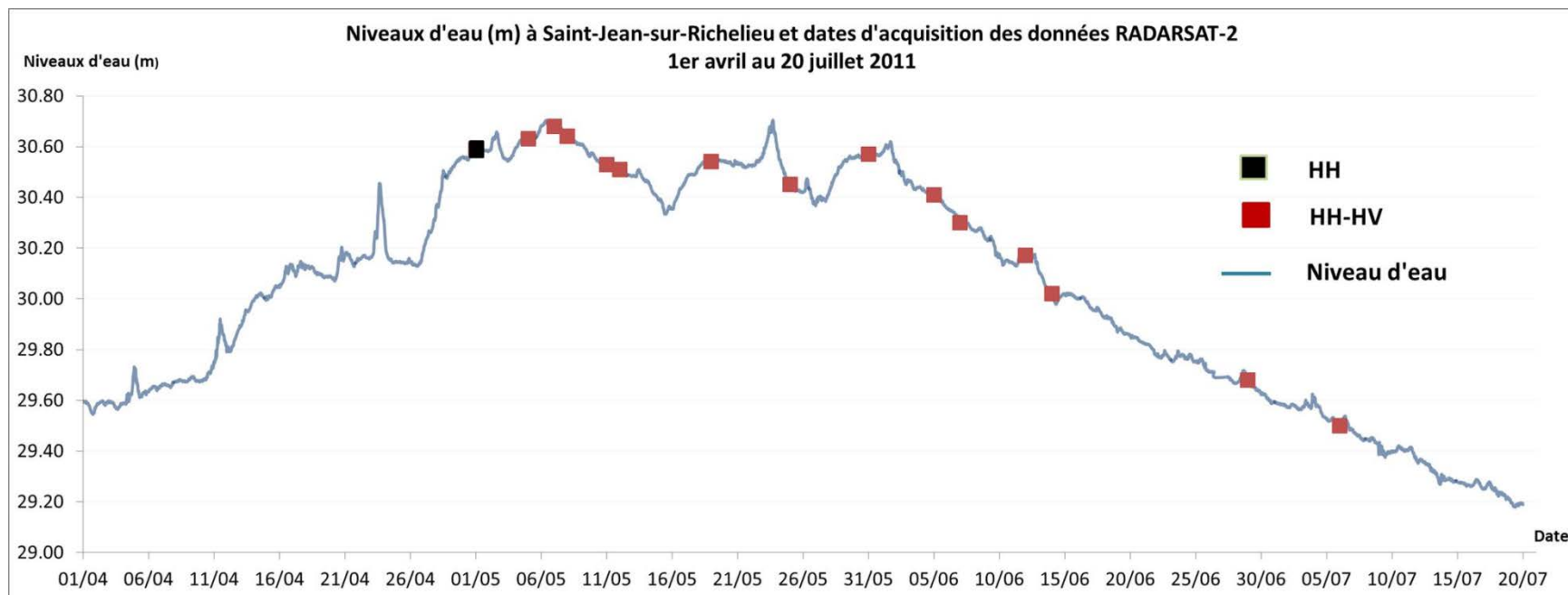


Figure 2 Niveau d'eau (Station Marina St-Jean-sur-Richelieu) notamment lors des dates d'acquisition des images

3 CARACTÉRISATION DE L'ALÉA INONDATION

Cette section vise à définir l'ensemble des principes et des concepts relatifs à la caractérisation de l'aléa inondation à partir de l'imagerie radar satellitaire. Les avantages et les limites des capteurs radar à synthèse d'ouverture seront tout d'abord présentés, ainsi que les concepts de base de la télédétection radar. Les interactions du signal radar avec les différents types de zones inondées seront ensuite définies. Enfin, nous présenterons les principales remarques issues de la revue de littérature et les orientations méthodologiques qui en découlent.

3.1 Les outils de cartographie de l'aléa inondation

Trois catégories d'outils permettent la cartographie de l'aléa inondation quand celui-ci est en cours. Il s'agit des relevés sur le terrain, de la modélisation hydraulique ainsi que de la télédétection. Cependant, et ce malgré leurs avantages respectifs, certains de ces outils présentent des limites importantes, qui réduisent leur intérêt pour la caractérisation de l'aléa inondation dans un contexte de gestion de crise.

3.1.1 Les relevés sur le terrain

L'acquisition de données directement sur le terrain est une méthode largement utilisée pour l'étude des phénomènes spatiaux et environnementaux, mais n'est pas adaptée à la caractérisation de l'aléa inondation en phase de gestion de crise. En effet, l'échantillonnage spatial réalisé sur le terrain est souvent peu élevé et mal distribué, ce qui ne permet pas d'obtenir des informations précises sur les limites des zones inondées et sur les hauteurs de submersion en tout point de ces zones (Townsend et Walsh, 1998). À cela s'ajoutent souvent des problèmes logistiques d'accès aux zones inondées et des coûts d'acquisition des données élevés (Hess et al., 1995; Lang et al., 2008). Enfin, et c'est une limite importante, le temps nécessaire à l'acquisition de données sur la zone, à leur traitement puis à la production d'une carte de l'aléa inondation est souvent trop long pour être adapté à la phase de gestion de crise, en particulier quand l'étendue des zones touchées est importante.

3.1.2 La modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques d'une rivière au cours d'une crue, telles que le débit, la hauteur d'eau, les surfaces inondées ou les vitesses de l'eau (Hostache et al., 2005; L'Homme, 2006). C'est un outil couramment employé dans le cadre de la gestion des inondations, aussi bien pour la prévision des inondations que dans les volets de prévention et de gestion de crise. Les modèles hydrauliques demeurent cependant une représentation schématique d'un système réel complexe et requièrent la compréhension et l'intégration de chaque processus du cycle de l'eau, à l'aide de données spécifiques (Estupina Borrell, 2004). Cela représente un volume important de données, qu'il peut parfois être difficile et coûteux d'obtenir à cause d'un manque inéluctable de stations de mesures, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain (Mason et al., 2012a; Matgen et al., 2007). Ces modèles restent donc teintés d'une part d'incertitude. Cette incertitude, de même que le manque de données nécessaires au fonctionnement optimal de ces modèles, peuvent cependant être réduits par l'intégration de données issues de sources autres que les relevés manuels sur le terrain ou les stations de mesures automatisées. En effet, les données issues de la télédétection sont parfois mises à profit durant les phases de calage et de validation des modèles hydrauliques (Giustarini et al., 2011; Mason et al., 2012b; Matgen et al., 2007).

3.1.3 La télédétection

Différents outils de télédétection peuvent être utilisés pour caractériser l'aléa inondation. La photographie aérienne, qui permet d'obtenir des images de haute résolution de la zone inondée, est considérée comme une source de données de qualité pour la délimitation et l'analyse des zones inondées (Schumann et al., 2009). Cependant, son utilisation pour la génération de cartes de l'aléa inondation est souvent limitée par le coût élevé des acquisitions aéroportées et par le temps nécessaire à l'acquisition des données, souvent trop long lorsque l'inondation est étendue (Mallinis et al., 2011). À cela peuvent s'ajouter des conditions météorologiques empêchant le survol de la zone inondée et enfin les difficultés de détection des zones inondées sous un couvert végétal dense ou à travers un épais couvert nuageux.

Les capteurs optiques satellitaires opérant dans les bandes du visible et de l'infrarouge (de 0.4 μm à 100 μm) ont permis d'améliorer l'accès aux données nécessaires à la

cartographie des inondations à un coût moins élevé que celui de la photographie aérienne (Brivio et al., 2002). La très haute résolution spatiale — de l'ordre du mètre — des capteurs les plus récents (Ikonos, WorldView, Geoeye, etc.) permet maintenant l'identification précise de la ligne d'eau et des objets urbains et sous-urbains inondés. C'est ainsi une avancée intéressante par rapport aux capteurs optiques plus anciens (Spot, Landsat, etc.) dont la résolution spatiale est ou était souvent de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres (Van der Sande et al., 2003). Cependant, l'acquisition de données de qualité est souvent fortement réduite par la présence d'un couvert nuageux récurrent durant les inondations, les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge ne pouvant pénétrer les nuages (Horritt et al., 2003; Marti-Cardona et al., 2010; Schumann et al., 2011). L'imagerie optique 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 Lu, 2004). Enfin, 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, ce qui peut s'avérer coûteux, le prix de ce type d'images variant entre 20 à 25 \$ par km², selon le capteur (André et al., 2002).

Les capteurs satellitaires opérant dans les micro-ondes passives — hyperfréquences allant de 1GHz à 100 GHz —, tels que les capteurs SSM/I ou AMSR-E, 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 au capteur d'acquérir des images en conditions nuageuses (Smith, 1997). Une des limites principales de ce type de capteur réside en leur 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 à 60 km, selon les capteurs — limite très fortement leur utilisation pour la détection précise des inondations au niveau local (Matgen et al., 2011). Leur grande emprise spatiale, 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.

3.1.4 La télédétection radar

Les satellites radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des capteurs actifs opérant dans les hyperfréquences (1 GHz à 40 GHz, selon les bandes). L'atmosphère ne présentant pas d'absorption marquée des hyperfréquences aux longueurs d'onde supérieures à 2 cm (soit environ 12 GHz), ces capteurs ont la capacité d'acquérir des images de la surface terrestre à travers les nuages, de jour comme de nuit (Bonn et al., 1996). Ils permettent ainsi de fournir des informations aux phases actives de la crue, durant lesquelles les conditions de nébulosité sont souvent importantes (Evans et al., 2010; Horritt et Bates, 2001).

De plus, 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). Ses capacités, qui seront détaillées par la suite, lui confèrent un fort potentiel pour la détection des changements de condition 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 TerraSAR-X, RADARSAT-2 ou encore COSMO-SkyMed, permettent maintenant l'acquisition d'images dont la résolution peut aller jusqu'à 1 mètre selon les modes d'acquisition (par exemple, 1 m avec le mode High Resolution Spotlight de TerraSAR-X, 3 m avec le mode Ultra Fin de RADARSAT-2 et 1 m avec le mode Spotlight de COSMO-SkyMed). Ces améliorations vers la très haute résolution spatiale, jusque-là non disponible 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., 2011a). Cependant, les mises en orbite des satellites de la constellation COSMO-SkyMed, et bientôt de ceux de la constellation RADARSAT-3, permettent un temps de revisite dans un délai maximal de 12 h (Pierdicca et al., 2010; Pulvirenti et al., 2011a). 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, l'acquisition de données en double polarisation (HH+HV ou VV+VH) et en quadruple polarisation (HH+VV+HV+VH) est maintenant possible avec certains capteurs (voir Tableau 2), et n'est donc plus limitée à la polarisation simple (HH ou VV) ou croisée (HV ou VH). Cela permet une meilleure discrimination entre les différentes surfaces présentes sur l'image car chaque signal reçu par le capteur possède une sensibilité particulière à diverses caractéristiques ou propriétés de surface (Baghdadi et al., 2001).

Un des problèmes récurrent associé aux images issues des capteurs RSO est celui du haut niveau de bruit qui dégrade les images et rend difficile leur interprétation. Ce bruit est provoqué par le phénomène d'interférences aléatoires entre les ondes cohérentes émises par le radar et une surface rugueuse, dans laquelle une infinité de réflecteurs élémentaires se trouvent (Henry, 2004). Ce bruit étant de nature multiplicative, il est d'autant plus fort que la rétrodiffusion est forte, ce qui rend l'analyse et l'interprétation des images parfois difficiles dans les zones urbaines ou boisées (Hahmann et al., 2008; Horritt, 1999).

Enfin, 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, et alourdir les traitements (Giustarini et al., 2011; Hahmann et al., 2008; Voigt et al., 2008). C'est le cas tout particulièrement dans les milieux urbains, où de multiples réflecteurs de l'ordre d'un ou deux mètres, 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 ont un potentiel très intéressant pour la détection et la délimitation des inondations, et se présentent comme les outils les plus adaptés à la génération d'informations adaptées au contexte de la gestion de crise (Cossu et al., 2009).

3.2 Principes de télédétection radar

Cette section rappelle brièvement les principes de base de la télédétection radar, qui seront régulièrement évoqués au cours de cette étude. Ces définitions sont issues de trois sources (Bonn et al., 1996; Henry, 2004; Polidori, 1997).

3.2.1 Physique du signal

Les systèmes radar sont des systèmes hyperfréquences composés d'un émetteur, qui émet une onde électromagnétique en direction d'une surface, et d'un récepteur, qui enregistre le signal réfléchi par cette surface. Le signal rétrodiffusé est mesuré sur les plans temporel (date de réception du signal) et énergétique (intensité du signal) puis comparé avec le signal émis. La mesure du temps de parcours de l'onde permet d'accéder à la distance entre l'antenne et la surface, et par conséquent à la distance entre les cibles élémentaires constituant la surface.

L'équation radar relie les caractéristiques du signal reçu, du radar et de la cible du point de vue énergétique, et est exprimée par l'équation suivante :

$$P_r = P_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 a}$$

Où P_r est la puissance reçue [W], P_e est la puissance émise [W], G est le gain de l'antenne [W], λ est la longueur d'onde, σ est la Surface Équivalente Radar [m²], D est la distance antenne-cible [m] et a est le coefficient de perte par absorption.

La Surface Équivalente Radar (SER) est une fonction qui intègre les paramètres liés à la surface de réflexion, tels que sa géométrie ou sa constante diélectrique, et est ainsi dépendante de la fréquence et de la polarisation du signal radar.

3.2.2 Longueur d'onde des systèmes RSO

Les systèmes radar utilisent une gamme de fréquences qui s'étend de 0.225 GHz à 36.0 GHz. Cette région du domaine des hyperfréquences est divisée en 7 bandes (Tableau 1).

L'atmosphère est presque transparente pour ces différentes bandes radar. Cependant, les bandes Ka et Ku sont peu utilisées pour la définition de systèmes spatiaux, car elles sont fortement atténuées par la troposphère.

La bande P est quant à elle fortement dispersée par l'ionosphère. Les autres bandes sont par conséquent les plus largement utilisées par les capteurs satellitaires.

Tableau 1 Bandes spectrales, plages de fréquences et longueurs d'ondes utilisées par les capteurs Radar (Henry, 2004)

P	0.025-0.390 GHz	133-76.9 cm
L	0.39-1.55 GHz	76.9-19.3 cm
S	1.55-4.20 GHz	19.3-7.1 cm
C	4.20-5.75 GHz	7.1-5.2 cm
X	5.75-10.90 GHz	5.2-2.7 cm
Ku	10.9-22.0 GHz	2.7-1.36 cm
Ka	22.0-36.0 GHz	1.36-0.83 cm

3.2.3 La polarisation

L'onde électromagnétique émise par une antenne radar est composée d'une variation du champ électrique $\vec{E}$ et du champ magnétique $\vec{M}$, ayant des axes orthogonaux (à 90 degrés l'un de l'autre). La polarisation décrit l'alignement et la régularité des champs électriques et magnétiques de l'onde dans le plan transverse à sa propagation. Elle se définit par la direction du champ électrique $\vec{E}$ par rapport au plan d'incidence qui contient le vecteur d'onde $\vec{k}$ et la normale de la surface de réflexion.

Les antennes d'un système radar peuvent être configurées de façon à émettre et à capter un rayonnement électromagnétique polarisé horizontalement ou verticalement. Ainsi, la polarisation est caractérisée par deux lettres : la première désigne la polarisation suivant laquelle l'onde est émise par le capteur et la seconde la direction dans laquelle l'antenne mesure l'onde rétrodiffusée.

La lettre H désigne une polarisation horizontale et la lettre V désigne une polarisation verticale. Selon les capteurs, différentes combinaisons de polarisation sont disponibles :

Polarisation simple	HH, VV, HV ou VH
Double polarisation	HH et HV, VV et VH, HH et VV
Quadruple polarisation	HH, VV, HV et VH

Lorsque l'onde radar frappe une surface et est réfléchiée, la polarisation peut être modifiée, tout dépendant des propriétés de ladite surface. Cette transformation modifie l'apparence de la scène sous imagerie radar polarimétrique, ce qui permet souvent de déterminer le type de surface frappée à partir de l'image.

3.2.4 L'angle d'incidence

L'angle d'incidence correspond à l'angle entre la direction antenne-cible et la normale au sol au niveau de la cible. La normale est le vecteur qui est perpendiculaire au sol, et dépend donc de la pente locale et de l'azimut du terrain.

Le phénomène de rétrodiffusion n'est généralement pas isotrope. Ainsi, la rétrodiffusion d'un objet ou d'une surface ne sera pas la même selon l'angle d'incidence avec lequel l'onde radar est émise.

3.2.5 Les systèmes radar à synthèse d'ouverture

La synthèse d'ouverture est une technique qui s'applique aux systèmes radar à visée latérale, permettant d'améliorer la résolution géométrique. Elle exploite, d'une part, le principe de la compression d'impulsion — simulant 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. Ce traitement de la phase du signal permet de simuler une antenne de très grande taille, d'où le nom de « synthèse d'ouverture ».

Ces deux traitements RSO donnent accès à des résolutions géométriques bien meilleures et donc à des produits d'imagerie plus intéressants tant sur les plans physique que thématique. Le tableau 2 résume les caractéristiques des différents capteurs radar cités au cours de cette étude.

Tableau 2 Caractéristiques des capteurs radar cités dans l'étude

Capteur	Lancement	Bande (GHz)	Résolution spatiale (m)	Polarisations	Temps de revisite (jours)
ERS-1	1991-2000	C (5,3)	25	VV	3
JERS-1	1992-1998	L (1,3)	18	HH	44
ERS-2	1995-2011	C (5,3)	25	VV	3
RADARSAT-1	1995-	C (5,3)	8-100	HH	24
ENVISAT	2002-2012	C (5,3)	9-2000	HH ou VV HH/VV ou HH/HV ou VV/VH	3
ALOS-PALSAR	2006-2011	L (1,3)	10-100	HH ou VV HH+HV ou VV+VH HH+HV+VH+VV	46
RADARSAT-2	2007-	C (5,4)	3- 100	HH ou VV HH+HV ou VV+VH HH+HV+VH+VV	24
COSMO-SkyMed	2007-	X (9,6)	1-100	HH, VV, HV ou VH HH+HV, VV+VH	16 (<1 à 4 jours avec constellation)
TERRASAR-X	2007-	X (9,6)	1-18	HH, HV, VH, VV HH-HV ou HH-VH, ou VV-HV	11

3.3 Interaction du signal radar avec les plans d'eau

La diffusion de l'onde radar reçue par une surface est dépendante des propriétés de la surface imagée (rugosité, constante diélectrique, composition et géométrie), des paramètres du capteur RSO utilisé (longueur d'onde et polarisation) mais aussi de la géométrie d'acquisition du capteur, à savoir la direction de l'orbite, l'angle d'incidence local et l'aspect de la cible par rapport à la position du capteur (Badji et Dautrebande, 1997; Sanyal et Lu, 2004). Nous définirons ici l'ensemble des interactions du signal radar avec les surfaces en eau dans différentes conditions.

3.3.1 Plans d'eau libre et champs inondés

Les plans d'eau libre et les champs non cultivés totalement inondés présentent des surfaces lisses avec une constante diélectrique élevée et agissent comme des réflecteurs spéculaires (Smith, 1997). L'énergie incidente est donc presque entièrement rétrodiffusée hors du champ de réception du capteur. Ces surfaces apparaissent ainsi avec des valeurs de rétrodiffusion très faibles sur l'image, donc des tons noirs (Brivio et al., 2002; Horritt et al., 2003). Les zones d'asphalte ou de béton, omniprésentes en milieu urbain et souvent étendues, agissent comme des réflecteurs spéculaires et peuvent être confondus avec des champs inondés ou des plans d'eau (Badji et Dautrebande, 1997). Il est cependant possible de limiter ces effets à l'aide d'informations auxiliaires dérivées de cartes topographiques ou de l'occupation du sol.

La rugosité des plans d'eau libre peut augmenter sous l'action d'un vent fort créant des vaguelettes à la surface de l'eau (Badji et Dautrebande, 1997). La réflexion diffuse remplace alors localement la réflexion spéculaire. Les vagues ayant une longueur d'onde proche ou supérieure à celle de la résolution du capteur peuvent ainsi être visibles sur l'image, sous la forme de traits linéaires clairs à la surface de l'eau (Hahmann et al., 2008; Mason et al., 2001; Stabel et Löffler, 2004).

Étant donné que les plus longues longueurs d'onde permettent d'obtenir un meilleur rapport de contraste entre la terre et l'eau, la bande X est plus adaptée à la détection des plans d'eau que les plus courtes longueurs d'onde, comme les bandes C et L (Martinis et al., 2009). Le choix de la polarisation joue également un rôle important dans la détection des plans d'eau libre. La polarisation HH semble être la plus adaptée pour distinguer les surfaces inondées des surfaces non inondées et offre la meilleure dynamique radiométrique (Ahtonen et Hallikainen, 2005; Henry et al., 2006).

On la préfère à la polarisation VV, qui permet une séparabilité assez similaire de l'eau et de la terre, mais qui est plus sensible à l'augmentation de la rugosité de surface. De même, les polarisations croisées HV et VH semblent être plus adaptées que la polarisation VV, car moins sensibles aux vagues et aux ondulations à la surface de l'eau (Horritt et al., 2003; Solbø et Solheim, 2005).

3.3.2 Végétation et zones boisées inondées

Lorsqu'un sol couvert de végétaux (cultures, plantes basses, bois) est inondé, le mécanisme de réflexion diffuse des sols secs ne domine plus. La constante diélectrique d'un sol inondé étant plus élevée que celle d'un sol sec, une quantité plus importante d'énergie sera réfléchie de manière spéculaire par le sol inondé, et sera soumise à une réflexion par double bond entre l'eau et les troncs et feuilles verticales de la partie inférieure de la végétation (Hess et al., 1995). À cela s'ajoute une diffusion de volume issue des parties supérieures de la végétation (André et al., 2002; Bonn et Dixon, 2005). Les forêts et la végétation inondées apparaîtront ainsi dans des tons clairs sur l'image, ce qui permet généralement de les distinguer des forêts et de la végétation non inondées, pour lesquelles la réflexion diffuse du sol réduit l'effet de réflexion par double bond, induisant des tons plus foncés (Hahmann et al., 2008; Horritt et Bates, 2001; Mason et al., 2012a). Les berges des rivières étant souvent bordées de zones végétales parfois larges de plusieurs mètres, 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).

Les courtes longueurs d'onde, comme les bandes C et X, ne peuvent traverser une canopée ou une végétation dense. En effet, la diffusion de volume issue des couches supérieures de la canopée domine la rétrodiffusion de ces ondes plus courtes, empêchant l'obtention d'informations sur la présence d'eau au sol (Townsend, 2002). À l'inverse, les plus longues longueurs d'onde, telles que les bandes L et P, sont capables de pénétrer la canopée et atteignent les couches inférieures de la végétation et le sol (Ahtonen et Hallikainen, 2005; Townsend, 2002). Ces bandes permettent ainsi de discriminer les forêts inondées des forêts non inondées, en tout contexte, tandis que les courtes longueurs d'ondes ne sont utiles qu'en présence d'une végétation moins dense, en conditions hivernales par exemple. De même, la contribution de la canopée est plus grande avec les petits angles d'incidence (< 35 degrés) qu'avec les grands angles

d'incidence (> 35 degrés), ce qui peut permettre de détecter les zones inondées et ce, même sous un couvert relativement dense (Hess et al., 1990; Mason et al., 2007). Enfin, la polarisation multiple semble apporter davantage d'informations sur la végétation inondée que la polarisation simple, et en particulier les polarisations HH et VV pour séparer les forêts inondées des forêts non inondées (Evans et al., 2010; Townsend, 2002).

3.3.3 Zones urbaines inondées

La rétrodiffusion des zones urbaines est dominée par des mécanismes de réflexion en coin et de réflexion par double bond dues à leurs structures angulaires, qui les font apparaître dans des tons très clairs sur une image RSO (Bonn et Dixon, 2005). Lorsqu'une zone urbaine est inondée, ces mécanismes restent les mêmes (Stabel et Löffler, 2004). Le signal est alors réfléchi intégralement par l'eau, en direction des bâtiments ou des arbres, puis en grande partie réfléchi directement de ces structures vers le capteur (Figure 3). Cela explique pourquoi les zones urbaines ont une forte rétrodiffusion même lorsqu'elles sont inondées lors de l'acquisition. Ainsi, distinguer les zones urbaines inondées des zones urbaines non inondées sur une image RSO est complexe (Mason et al., 2010; Sanyal et Lu, 2004; Solbø et Solheim, 2005). Les zones inondées en milieu urbain sont ainsi détectables uniquement quand les bâtiments sont suffisamment éloignés les uns des autres pour laisser la réflexion spéculaire dominer (Martinis et al., 2011).

Les avenues bordées d'arbres, que l'on retrouve souvent en milieu urbain, génèrent également une réflexion par double bond, ce qui leur donne des tons clairs sur une image RSO et ce, qu'elles soient inondées ou non (Sanyal et Lu, 2004). Aussi, il est important de souligner qu'à cause de la géométrie de vue des capteurs RSO, les phénomènes d'ombre et de déversement causés par les bâtiments et les arbres peuvent masquer une partie de l'inondation, à certains angles d'incidence ou en visée descendante (Mason et al., 2010). Cela peut poser un problème important dans les zones résidentielles de banlieues, qui regroupent souvent des maisons unifamiliales entourées d'un nombre d'arbres assez élevé (Oberstadler et al., 1997). Ces phénomènes d'ombre et de déversement se retrouvent aussi dans les zones au relief marqué.

Étant donné que ces phénomènes sont irréversibles, une partie de l'information peut être masquée et les tons noirs peuvent se confondre avec des plans d'eau libre (Brivio et al., 2002; Schumann et al., 2012). Peu d'études ayant été réalisées sur les zones urbaines inondées à ce jour, nous ne pouvons indiquer avec précision quels sont les paramètres d'acquisition les plus adaptés.

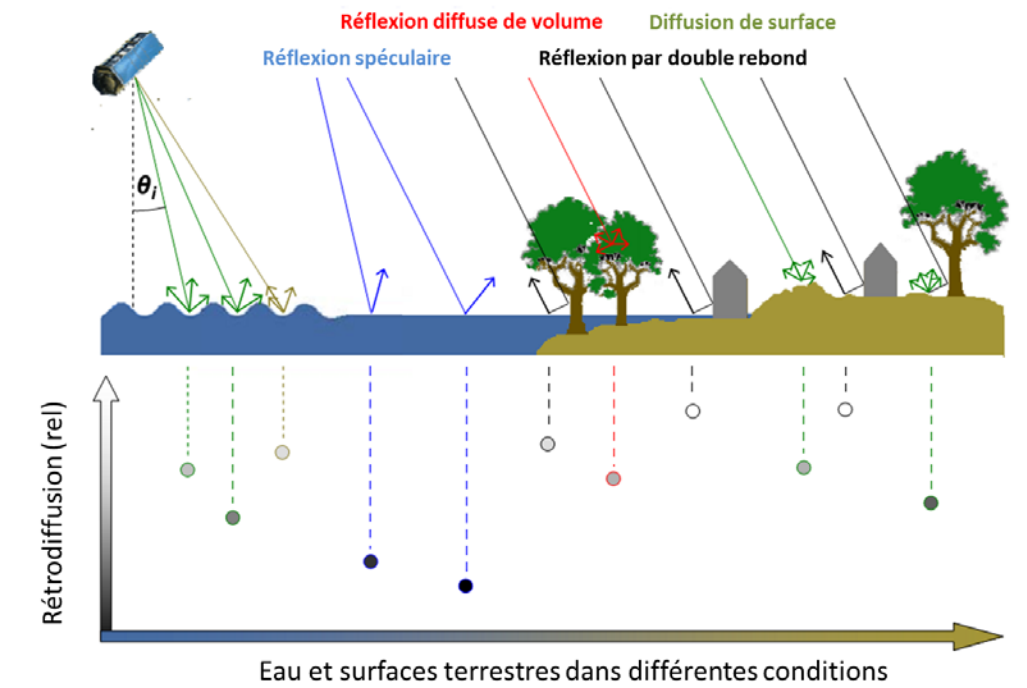


Figure 3 Mécanismes et intensité de rétrodiffusion des surfaces inondées et des surfaces sèches (d'après Schumann et al. (2012))

Ainsi, la détection des surfaces inondées peut être entravée par plusieurs facteurs, relatifs à la nature de la surface inondée imagée, aux effets de la géométrie du terrain ou encore à des paramètres d'acquisition inappropriés (Matgen et al., 2011; Stephens et al., 2012). Le développement d'une méthodologie de caractérisation de l'aléa inondation fiable et précise doit donc tenir compte de l'ensemble de ces facteurs.

3.4 Analyse des méthodologies de caractérisation de l'aléa inondation à l'aide de l'imagerie radar satellitaire

Cette section apporte une vue générale de l'état de l'art en matière de techniques de délimitation des zones inondées et d'évaluation des hauteurs d'eau. Elle se divise en différents points, selon les éléments majeurs qui ressortent de cette revue de littérature.

3.4.1 Milieu urbain et milieu rural

Malgré le fait que le risque est souvent bien plus important en zone urbaine qu'en zone rurale, la rareté des études portant de manière spécifique sur le développement d'une méthodologie de détection des zones urbaines inondées est flagrante (Mason et al., 2007). Cela peut s'expliquer, d'une part, par le fait que la très haute résolution spatiale, nécessaire à la détection des inondations en milieu urbain, n'est disponible que depuis peu (2006) sur les capteurs radar satellitaire. D'autre part, le temps de revisite des capteurs de très haute résolution spatiale étant encore élevé (voir Tableau 2), le nombre d'évènements durant lesquels il est possible d'acquérir des images RSO d'inondations urbaines est fortement réduit (Mason et al., 2011; Schumann et al., 2012). Les satellites permettant d'acquérir des images de ces évènements sont donc avant tout des satellites de faible résolution spatiale (~ 100 m) qui, eux, ont un temps de revisite plus court, mais ne sont pas adaptés aux analyses à l'échelle intra-urbaine (Schumann et al., 2011). La mise en orbite de constellations de capteurs à très haute résolution spatiale ouvre cependant des possibilités intéressantes pour une exploitation plus efficace des images RSO dans les applications en zones urbaines (Giustarini et al., 2011; Pellizzeri et al., 2003).

3.4.2 Capteurs et données utilisées pour la détection des zones inondées

L'analyse des données utilisées dans les diverses études portant sur la délimitation des zones inondées permet d'appuyer le constat précédent.

En effet, seules quelques images de très haute résolution spatiale présentant une situation d'inondation en zone urbaine sont disponibles. Parmi ces images, celles acquises par le satellite TerraSAR-X (mode StripMap, polarisation HH, angle d'incidence de 24°) lors de l'inondation de la ville de Tewkesbury (Angleterre) en 2007 ont souvent été utilisées dans les études les plus récentes (Giustarini et al., 2011; Martinis et al., 2011; Mason et al., 2010; Schumann et al., 2011; Voigt et al., 2008). Les

systèmes radar aéroportés (ASAR) ont également été mis à profit dans certaines études et permettent d'obtenir une vue très détaillée de la zone touchée, avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre (Bates et al., 2006; Néelz et al., 2006). Enfin, quelques images présentant des zones urbaines et rurales inondées ont été acquises par les capteurs ENVISAT, RADARSAT-1, ERS-1 et ERS-2 (Di Baldassarre et al., 2009; Pellizzeri et al., 2003; Voigt et al., 2008). Ces images ayant une résolution spatiale moindre (> 10 mètres), l'analyse précise des zones urbaines inondées n'est pas possible et les zones inondées détectées sont surtout les plans d'eau libres.

Au niveau des études en milieu rural, les capteurs et paramètres d'acquisition sont plus variés. Les capteurs les plus utilisés pour la détection des zones inondées en milieu rural sont les capteurs ERS-1, ERS-2 et ENVISAT (Dellepiane et al., 2000; Giordano et al., 2005; Horritt et Bates, 2001; Oberstadler et al., 1997; Stabel et Löffler, 2004). Les satellites RADARSAT-1 et RADARSAT-2 ont été utilisés dans quelques études seulement, en particulier pour l'analyse et le suivi des zones humides inondées (Evans et al., 2010; Kussul et al., 2011; Pellizzeri et al., 2003). Les acquisitions réalisées par les capteurs de haute résolution spatiale sont en nombre plus restreint. Les images issues du capteur COSMO-SkyMed ont été utilisées à quelques reprises (Angiati et al., 2010; Hahmann et al., 2008). On peut citer en particulier la série de cinq images en polarisation HH acquises lors de l'inondation de la rivière Tanaro (Italie) et utilisées par la suite dans de nombreuses études (Chini et al., 2011; Dellepiane et al., 2010; Pierdicca et al., 2010; Pulvirenti et al., 2011a; Pulvirenti et al., 2010).

Ainsi, à ce jour, seul le capteur TerraSAR-X a permis l'acquisition de données de haute résolution spatiale présentant une inondation en milieu urbain. Ce manque de données peut induire deux contraintes : les méthodologies développées sont souvent spécifiques au site d'étude sur lequel elles ont été développées et les résultats générés n'ont pas toujours la même précision si des données aux caractéristiques différentes sont utilisées. Enfin, on constate que les données RADARSAT-2 (bande C) de haute résolution spatiale n'ont jamais été utilisées pour la détection des zones inondées en milieu urbain. Les images disponibles pour cette étude, acquises en polarisation simple HH (mode Ultra Fin) mais aussi en double polarisation HH-HV (mode Fin et mode Standard), avec différents angles d'incidences et différentes polarisations, constituent donc la première opportunité de tester et d'évaluer l'intérêt de paramètres d'acquisition différents pour la détection des zones inondées en milieu urbain.

3.4.3 Techniques de traitement de l'image pour la détection et la délimitation des zones inondées

De nombreuses techniques de traitement de l'image ont été utilisées pour détecter et délimiter les zones rurales et urbaines inondées sur des images RSO. Ces techniques ont été référencées dans plusieurs articles ou ouvrages (Liu et al., 2004; Sanyal et Lu, 2004; Schumann et al., 2012). Parmi les techniques les plus souvent utilisées, on retrouve le seuillage d'histogramme de l'image (Henry et al., 2006; Hess et al., 1995; Schumann et al., 2007), les méthodes de détection des changements multi-temporels (Badji et Dautrebande, 1997; Boni et al., 2007; Giordano et al., 2005) et les modèles statistiques de contours actifs (Ahtonen et Hallikainen, 2005; Bates et al., 2006; Horritt, 1999; Matgen et al., 2007). À cela s'ajoutent l'interprétation visuelle simple (Brivio et al., 2002; Maggi et al., 1998; Oberstadler et al., 1997), les algorithmes de classification par texture de l'image (Schumann et al., 2007; Vinu Chandran et al., 2006), l'analyse en composante principale (Gan et al., 2012; Matgen et al., 2007) et enfin les algorithmes de classification automatique (Bonn et Dixon, 2005; Hoque et al., 2011; Sohn et al., 2005).

3.4.4 Méthodologies non adaptées au contexte de gestion de crise

Malgré la volonté affichée d'un grand nombre d'études de développer des méthodologies de cartographie des zones inondées servant de support à la gestion du risque d'inondation, on remarque que les impératifs identifiés en matière d'automatisation des traitements et d'accès rapide aux données nécessaires ne sont souvent pas atteints, mais aussi que les méthodes développées sont souvent spécifiques à un site d'étude (Matgen et al., 2011; Schumann et al., 2011). La revue de littérature nous a permis d'identifier deux approches très largement utilisées mais qui ne peuvent s'inscrire dans un contexte opérationnel.

La technique du seuillage est souvent utilisée pour séparer les zones inondées des zones non inondées sur les images RSO et est appréciée pour sa simplicité et son faible temps de traitement (Brivio et al., 2002; Henry et al., 2006; Martinis et al., 2009; Zwenzner et Voigt, 2009). L'approche est simple : tous les pixels de l'image RSO ayant une intensité ou une amplitude inférieure à un seuil fixé suite à l'analyse de l'histogramme des rétrodiffusions de l'image sont considérés comme « inondés » et ceux ayant une rétrodiffusion plus élevée sont considérés comme « non inondés ». Pour

fixer ce seuil, on utilise souvent la faible rétrodiffusion des plans d'eau — à la surface desquels la réflexion spéculaire domine — qui permet de les distinguer aisément des autres types d'occupation du sol (Martinis et al., 2009). Cette approche est aussi souvent utilisée dans les approches de segmentation de l'image par croissance de région ou par contour actif, où elle sert à sélectionner les pixels servant de « noyaux » de croissance (Mason et al., 2011; Matgen et al., 2011). Cependant, si le seuillage d'histogramme permet généralement la détection précise des plans d'eau, il ne s'adapte pas à la détection des zones inondées dont les mécanismes de rétrodiffusion sont plus complexes et dont les coefficients de rétrodiffusion varient selon les paramètres d'acquisition de l'image (zones urbaines, forêts, végétation) et selon les caractéristiques de la zone imagée (Pulvirenti et al., 2010). Il n'est donc pas possible de fixer un seuil unique et universel pour délimiter chaque type de zone inondée, ce qui la rend difficilement automatisable (Sanyal et Lu, 2004). Des efforts ont cependant été faits dans ce sens, mais encore peu d'études utilisent la technique du seuillage sous forme automatisée (Ahtonen et Hallikainen, 2005; Schumann et al., 2007; Solbø et Solheim, 2005).

Les techniques multi-temporelles de détection des changements ont également été utilisées fréquemment pour la détection et la cartographie des zones inondées, étant elles aussi appréciées pour leur simplicité et leur rapidité (Boni et al., 2009). Cette approche se base sur le principe de la forte dépendance de la rétrodiffusion de l'intensité du signal aux propriétés diélectriques de la surface, et a pour objectif de détecter les changements de rétrodiffusion entre deux images RSO, l'une acquise hors inondation et l'autre durant l'inondation (Badji et Dautrebande, 1997). Une détection des changements d'amplitude mais aussi de cohérence peut être réalisée. Les approches par amplitude recherchent dans l'image les baisses de rétrodiffusion correspondant généralement à des surfaces totalement submergées durant l'inondation et les augmentations de rétrodiffusion correspondant à l'émergence de surfaces et à des mécanismes de réflexion par double bond (Andreoli et Yesou, 2007). Deux méthodes de détection des changements, souvent utilisées, ont été relevées dans la littérature : les compositions colorées faites à partir de deux images ou plus (Angiati et al., 2010; Boni et al., 2009; Cossu et al., 2009; Temimi et al., 2011; Weydahl, 1996), les opérations arithmétiques entre deux images (Andreoli et Yesou, 2007; Hahmann et al., 2008; Nico et al., 2000) et les approches par cohérence. Ces dernières utilisent les informations de phase dérivées de l'interférométrie RSO (Dellepiane et al., 2010; Giordano et al., 2005;

Smith, 1997; Wdowinski et al., 2006). L'eau peut alors être identifiée à l'aide des régions ayant une faible corrélation de phase interférométrique entre les deux images, les surfaces sèches ayant une plus forte cohérence.

Ces méthodes de détection des changements, bien qu'avantageuses, présentent deux limites majeures. Dans un premier temps, elles nécessitent l'utilisation d'au moins deux images, dont les paramètres d'acquisition doivent être similaires (fréquence, polarisation, angle d'incidence) et dont la différence temporelle n'est pas trop élevée pour ne pas que des changements dus à l'occupation du sol ou à un stade de croissance de la végétation différent entrent en jeu (André et al., 2002; Boni et al., 2009; Weydahl, 1996). Or, ces besoins sont difficilement satisfaits dans les applications opérationnelles (Angiati et al., 2010). De plus, les résultats produits par la méthode de détection des changements ne constituent pas une carte finale utilisable, et les résultats doivent encore être classifiés ou interprétés. Certaines études proposent ainsi le recours à l'interprétation visuelle (Stabel et Löffler, 2004; Weydahl, 1996), au seuillage (Andreoli et Yesou, 2007; Giordano et al., 2005; Temimi et al., 2011), à la segmentation orientée objet sur une image composée-couleur ou encore à l'application d'un indice de différence normalisé (Badji et Dautrebande, 1997). Ainsi, si les approches de détection des changements sont souvent automatisées, les méthodes de classification nécessaires à la production de la carte finale ne le sont pas toujours.

3.4.5 Intérêt des approches orientées objet

Les éléments individuels présents dans une image RSO de très haute résolution spatiale ont une grande variance spectrale, ce qui résulte en des variances importantes à l'intérieur d'une même classe thématique, et ainsi en une confusion interclasse élevée (Mason et al., 2012a). À cela s'ajoute le bruit souvent important qui dégrade les images RSO. Ainsi, les approches de classification par pixel, qui classent les pixels de manière indépendante sur la base de leurs rétrodiffusions, ne peuvent produire de bons résultats sur ce genre d'images (Voigt et al., 2008). Les méthodes d'analyse de l'image orientées objet semblent être une des meilleures manières de s'affranchir de ces phénomènes (Mallinis et al., 2011).

En effet, au lieu de tenter de reconstruire une estimation de la rétrodiffusion pour chaque pixel, la segmentation s'affranchit du bruit en identifiant des régions ou des objets dont les propriétés de texture ou les tons de gris sont similaires à constants (Hahmann et al., 2008). Les objets identifiés par la segmentation peuvent ensuite être classifiés selon des paramètres tels que l'information de contexte, la texture, la géométrie de l'objet, etc. (Pulvirenti et al., 2011a).

La méthode de segmentation statistique de l'image par contours actifs ou « snakes », développée par Kass et al. (1988) a été très largement utilisée pour la détection des zones inondées en milieu rural (Horritt et Bates, 2001; Mason et al., 2007; Néelz et al., 2006; Voigt et al., 2008). Les contours actifs sont des contours curvilignes qui évoluent dans le temps et dans l'espace bidimensionnel de l'image pour s'approcher de la forme d'un objet à détecter et s'y fixer. Ils utilisent les propriétés de texture et/ou de ton, mesurées au niveau local le long des contours, pour distinguer les limites des objets (Horritt, 1999; Matgen et al., 2007). L'évolution de ces contours est guidée par une fonction d'énergie définie par l'utilisateur selon les caractéristiques de l'image (Horritt et Bates, 2001). Si cette méthode permet une délimitation précise des plans d'eau libre (supérieure à 90 %) et permet de s'affranchir du bruit de l'image, elle n'est cependant pas appropriée pour la détection des zones inondées en milieu urbain (Mason et al., 2012a). Les contours curvilignes ne s'adaptent pas, en effet, à l'étroitesse des rues en milieu urbain. De plus, plusieurs de ses paramètres requièrent des ajustements manuels et semblent encore difficilement automatisables, ce qui constitue une limite importante pour notre projet (Ahtonen et Hallikainen, 2005).

Une approche plus simple de segmentation par croissance de région peut être utilisée, où le noyau de croissance s'étend aux pixels voisins selon leurs propriétés statistiques jusqu'à ce que les conditions de similitude ne soient plus remplies (Malnes et al., 2002). Une approche de croissance de région supervisée pour les zones urbaines est proposée par Mason et al. (2010) sur des données TerraSAR-X de très haute résolution spatiale, sur lesquelles les effets d'ombre et le repliement en milieu urbain ont été masqués. Les noyaux de croissance sont déterminés à l'aide d'un seuillage automatique, puis le regroupement des pixels se fait à l'aide d'un opérateur morphologique de dilatation des régions par itérations successives, puis par l'application d'un second opérateur morphologique d'érosion sur ces régions.

Cette même méthode a été utilisée par Pulvirenti et al. (2011a), sur une série d'images COSMO-SkyMed d'une région rurale proche de la ville d'Alessandria, en Italie. Son originalité réside dans le fait que les segments délimités automatiquement sur l'image par les opérateurs morphologiques d'érosion et de dilatation sont ensuite classifiés à l'aide d'une approche par logique floue permettant d'intégrer les connaissances théoriques de la rétrodiffusion radar des zones inondées à l'aide de modèles électromagnétiques de diffusion, des considérations hydrauliques simples et d'informations contextuelles.

3.4.6 Intégration des paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques sont peu utilisés dans les études portant sur la délimitation des zones inondées à l'aide de l'imagerie RSO (Pierdicca et al., 2008). La plupart des méthodes développées utilisent en effet uniquement les caractéristiques de rétrodiffusion des surfaces inondées et seules quelques études intègrent les aspects hydrauliques.

Une des premières études mettant à profit des considérations hydrauliques tente d'estimer les zones inondées au maximum d'une crue à l'aide de la position des plans d'eau stagnants observés après la crue sur des images RSO (ERS-1) et des informations topographiques extraites d'un modèle numérique d'élévation (MNE) (Brivio et al., 2002). La méthode utilise une matrice cumulée de moindre distance-coût pour retrouver les cellules submergées durant l'inondation, en retraçant le chemin de l'eau entre la zone stagnante observée sur l'image RSO et le lit de la rivière. Cette matrice permet de prendre en compte l'énergie nécessaire à l'eau pour surmonter les éléments naturels et anthropiques qui freinent l'écoulement de l'eau sur une surface — tels que la topographie montante, la rugosité de surface, le couvert végétal et l'utilisation du sol, qui sont autant de facteurs de résistance — et alors atteindre une cellule de hauteur supérieure. Les considérations hydrauliques sont ainsi intégrées de manière simple : étant donné que le coût est fonction de la topographie et de la distance combinées, le débit nécessaire à l'eau pour atteindre des cellules à « coût » plus élevé doit en même temps être suffisant pour que l'eau atteigne aussi les cellules ayant un « coût » moins élevé. Cependant, la résistance est un paramètre très complexe à modéliser selon les auteurs, qui font ainsi la supposition que les caractéristiques de rugosité de la surface sont constantes à travers toute la zone. Malgré cela, cette méthode semble produire des

résultats satisfaisants en zone rurale. Une méthode assez similaire, basée uniquement sur la distance euclidienne au point de destination, a été utilisée pour la sélection de pixels supposés inondés à partir d'une ligne maximale de hauteur d'eau extraite en zone rurale (Mason et al., 2012a). La délimitation des zones urbaines inondées qui en résulte teintée d'une très large part d'erreur (environ 35% des pixels sont correctement classifiés) et est ainsi insuffisante. On peut ainsi supposer que le facteur « résistance », particulièrement présent en zone urbaine à cause du grand nombre d'éléments anthropiques qui s'y trouvent, doit être pris en compte lorsqu'on intègre l'hydraulique urbaine à une méthodologie de détection.

Les travaux réalisés par Macina et al. (2006) et par Pierdicca et al. (2008) mettent également les considérations hydrauliques à profit, au sein d'une approche hybride combinant la détection des changements de rétrodiffusion entre des images ERS-1 acquises avant puis au cours d'une inondation et la logique floue. Ces considérations hydrauliques sont intégrées sous la forme de fonctions d'appartenance, relatives à l'information de contexte des pixels et aux caractéristiques de surface extraites d'un MNE. Elles sont basées sur les principes suivants :

- la probabilité de présence d'un pixel inondé isolé à l'intérieur d'une zone de pixels non inondés (ou inversement) est faible,
- la probabilité de présence de pixels non-inondés proches de pixels inondés situés à une plus haute altitude est faible
- Enfin, la probabilité de présence d'un pixel inondé proche de pixels non inondés situés à une plus faible altitude est faible.

Une fonction d'appartenance correspondant à la proximité d'un pixel à un plan d'eau est par la suite intégrée à cette même approche (Pierdicca et al., 2010; Pulvirenti et al., 2011a). L'idée est ainsi que si une rivière sort de son lit, la probabilité d'inondation est forte pour les pixels proches de la rivière ayant une altitude n'excédant pas celle du lit de la rivière. Ces pixels auront alors un fort degré d'appartenance à la classe pixel inondés.

Dans une approche développée par Mason et al. (2010), les auteurs estiment raisonnable de supposer qu'en condition d'inondation, le niveau d'eau en zone urbaine ne devrait pas être beaucoup plus élevé que dans les zones rurales proches. Ainsi, la hauteur maximale de la ligne d'eau déterminée en zone rurale grâce à une segmentation par « snake » est utilisée pour déduire la hauteur d'eau maximale en zone urbaine.

Cela permet de sélectionner un ensemble de pixels en zone urbaine situés sous la ligne maximale des eaux et dont la rétrodiffusion est spéculaire, lesquels serviront de base à une interpolation par krigeage ou encore de noyaux à un algorithme de croissance de région (Mason et al., 2011).

Les méthodes qui viennent d'être présentées intègrent ainsi les notions de débit nécessaire lors de l'inondation pour couvrir une surface que l'on sait être inondée, mais aussi la notion de connectivité hydraulique des pixels inondés, dans les domaines spatial et topographique, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain. Or, bien que la connectivité topographique semble être un apport intéressant pour les méthodes de classification en zone rurale, elle semble l'être moins en zone urbaine, où les résultats sont beaucoup moins probants (Mason et al., 2012b; Schumann et al., 2011). Étant donné que les études en zone urbaine utilisent toutes des données LIDAR d'une résolution spatiale de 2 mètres acquises hors inondation, leurs résultats ne peuvent être entièrement imputables à des données topographiques inadaptées. Cela peut cependant être dû en grande partie à la présence d'éléments complexifiant les connectivités hydrauliques à l'échelle micro-topographique, tels que des murs, clôtures, digues, etc. Ainsi, ces paramètres de connectivité topographique doivent être utilisés avec précaution en milieu urbain.

3.4.7 Estimation des hauteurs d'eau

Les hauteurs d'eau ne peuvent être extraites directement des données RSO, ce qui nécessite le recours à des méthodes de mesure indirecte et, ainsi, à l'intégration de données auxiliaires (Smith, 1997; Voigt et al., 2008). Les mesures indirectes impliquent la fusion d'une image RSO et de données topographiques (Sanyal et Lu, 2004). L'image satellite RSO, sur laquelle les zones inondées ont été préalablement délimitées, est projetée sur un MNE et est transformée en plan de crue. On obtient alors une « lame d'eau » par l'intersection des deux couches d'information, ce qui permet d'estimer les hauteurs de submersion dans les zones inondées (André et al., 2002).

Sur cette base, différentes méthodes ont été développées. La plus simple consiste en l'extraction manuelle des zones inondées après la fusion des limites de l'inondation avec une carte topographique au 1 : 5000 (Oberstadler et al., 1997; Schumann et al., 2008). La résolution spatiale des données topographiques utilisées dans cette étude étant trop faible, les erreurs d'estimation du niveau d'eau peuvent aller jusqu'à 2 mètres.

L'utilisation de MNE dérivés de relevés LIDAR, dont la résolution spatiale est de l'ordre du mètre, s'est largement développée depuis le début des années 2000 (Hostache et al., 2009; Néelz et al., 2006; Zwenzner et Voigt, 2009). La fusion de ces données topographiques de haute résolution spatiale avec les limites des zones inondées extraites d'images RSO améliore globalement l'extraction des hauteurs d'eau, atteignant généralement une précision de 0.5 à 1.1 mètres. De meilleurs résultats sont cependant obtenus avec l'utilisation de modèles d'interpolation et de modèles de régression sur les hauteurs d'eau issues de la fusion des données LIDAR et des données RSO (Bates et al., 2006; Matgen et al., 2007; Schumann et al., 2007).

Les niveaux d'eau obtenus ont alors une précision de l'ordre de 20 à 35 cm, ce qui peut être considéré comme très précis. Une des limites majeures de ces méthodes est qu'elles ne sont pas automatisables.

Un des problèmes récurrents associés à l'extraction des hauteurs d'eau par fusion des limites des zones inondées extraites des images RSO et de données topographiques est l'incertitude importante sur les résultats. Ces incertitudes peuvent avoir trois sources : les paramètres de segmentation de l'algorithme servant à délimiter les zones inondées, la correspondance géométrique des deux couches de données utilisées et, enfin, la précision verticale et la résolution horizontale du MNE (Giustarini et al., 2011). De légères erreurs de classification des zones inondées, des imprécisions durant le processus de géocodage ou encore l'utilisation de données RSO et topographiques dont les résolutions spatiales sont trop grossières ou trop différentes l'une de l'autre, peuvent réduire de manière importante la qualité des estimations de la hauteur d'eau dans les zones inondées (Zwenzner et Voigt, 2009).

Ainsi, les données topographiques doivent être sélectionnées avec soin. Les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), dont la précision verticale varie beaucoup avec la localisation (de 3.5 à 16 mètres selon les zones), produisent une erreur trop importante et ne peuvent en aucun cas être utilisées à l'échelle locale (Schumann et al., 2008). Les données LIDAR, certes plus chères et couvrant une petite zone, semblent les plus appropriées grâce à leur haute résolution spatiale.

3.4.8 Prise en compte des effets géométriques en zone urbaine

Étant donné que peu d'études portent de manière spécifique sur la délimitation des zones inondées en milieu urbain, les méthodes permettant de tenir compte des effets d'ombre et de déversement et ainsi de limiter leurs impacts sur la qualité des résultats de la classification sont encore peu nombreuses. Nous n'en avons ainsi recensé qu'une. Cette méthode, appelée SETES pour SAR End-to-End simulator, a été développée par Speck et al. (2007) et a été utilisée par Mason et al. (2012a) et Mason et al. (2011) pour la délimitation des zones inondées en milieu urbain à l'aide d'images TerraSAR-X. Elle permet d'estimer les régions de l'image où l'eau pourrait ne pas être visible à cause de la présence d'ombre ou de déversement. L'estimation de ces régions est purement géométrique et utilise le LIDAR DSM de la surface de la scène ainsi que les paramètres d'acquisition de l'image RSO, à savoir la direction de visée du radar et l'angle d'incidence. Les résultats sont des images binaires montrant l'ombre et le déversement qui sont par la suite combinées pour créer un masque sur l'image RSO. Cette méthode peut demander des temps de calculs parfois longs (plusieurs dizaines de minutes), selon la taille de la zone urbaine, mais peut être réalisée en période de pré-classification, une fois les paramètres de l'image RSO connus.

Ainsi, l'utilisation de cet outil permet de masquer les effets d'ombre et de déversement en zone urbaine, ce qui permet de réduire les erreurs de classification. Il peut cependant être important de souligner que, dans ce cas, une partie de l'information en zone urbaine est perdue. On ne peut donc pas calculer l'apport réel de cet outil dans les résultats de la classification, les résultats étant en grande partie dus aux techniques de classification développées et à la précision des données utilisées.

3.5 Méthodologie de caractérisation de l'aléa inondation

Cette dernière section présente les orientations méthodologiques définies à l'issue de la revue de littérature.

Ces orientations méthodologiques reposent sur la définition préalable d'une fonction de débit-niveau, selon la méthode développée par Poulin et al. (2012) dans le cadre du projet CADYRI. L'objectif de cette méthode, qui est déjà opérationnelle, est de déterminer, pour un débit donné, le niveau de la surface d'eau associée et subséquent de dériver l'étendue de la plaine inondable et la profondeur de

submersion en tout point de la zone inondée, en utilisant le modèle numérique de terrain de cette zone. Cette relation débit-niveau est calculée en tous points du domaine à partir des cotes de récurrence officielles disponibles pour les crues de récurrence 2, 20 et 100 ans et des débits correspondants établis dans le cadre du programme de cartographie des zones inondables et du programme de détermination des cotes de crues (PDCC).

Pour les besoins de cette étude, la relation débit-niveau créée à l'aide de l'outil CADYRI sera inversée. En effet, la fusion de l'image RSO et du MNE va permettre de déterminer les niveaux d'eau en certains points du domaine que l'on estime être inondés avec certitude, sur la base de leurs caractéristiques de rétrodiffusion. Ainsi, ce qui est recherché n'est plus le niveau d'eau, mais le débit nécessaire à l'inondation de ce ou de ces points, afin de calculer et de simuler une plaine inondée « minimale » pour la zone. Cette plaine inondée minimale permettra de détecter les zones inondées avec certitude. Les caractéristiques de rétrodiffusion et l'occupation du sol des zones situées entre le lit de la rivière et la limite supérieure de l'inondation seront extraites afin de créer une bibliothèque de rétrodiffusion, contenant des signatures de référence pour chaque classe de zone inondée (urbain inondé, forêt inondée, champs inondés, végétation inondée, etc.) Cette bibliothèque de rétrodiffusion permettra par la suite de réaliser une classification de l'ensemble de la zone d'étude. Un affinement de la classification sera ensuite réalisé, afin de minimiser les erreurs de classification. Cet affinement intégrera diverses fonctions de probabilité relatives à l'information de contexte des segments de l'image, aux connectivités spatiale et topographique et enfin à la cote de récurrence simulée pour les points éloignés. Les différentes étapes de cette méthodologie sont présentées dans la figure 4 et sont détaillées ci-après.

Étant donné qu'un des objectifs de cette étude est de déterminer quel peut être l'apport des données RADARSAT-2 en polarisation HH et en polarisation HH-HV pour la détection des zones inondées, cette méthodologie sera testée sur les différentes images radar disponibles, avec différentes combinaisons de paramètres d'acquisition (polarisation, angle d'incidence, orbite). De même, à chaque étape de classification de l'image, différents paramètres seront testés et évalués. Ces différents essais sont nécessaires à la définition de l'outil le plus adapté à la détection des zones inondées.

Cette méthodologie peut être considérée comme novatrice car c'est la première fois qu'une fonction niveau-débit est intégrée comme paramètre de délimitation des zones inondées sur des images RSO de haute résolution spatiale. Cette méthodologie

nécessite un certain nombre de données autres que les images RADARSAT-2, ce qui pourrait être un facteur limitant dans un contexte de gestion de crise. Ces données, à savoir les modèles numériques de terrain, l'occupation du sol ou encore les niveaux et débit des cotes de crue de référence de 2, 20 et 100 ans, sont cependant disponibles pour la majorité des rivières et des municipalités du Québec. L'intégration de données auxiliaires ne présente ainsi pas une contrainte majeure.

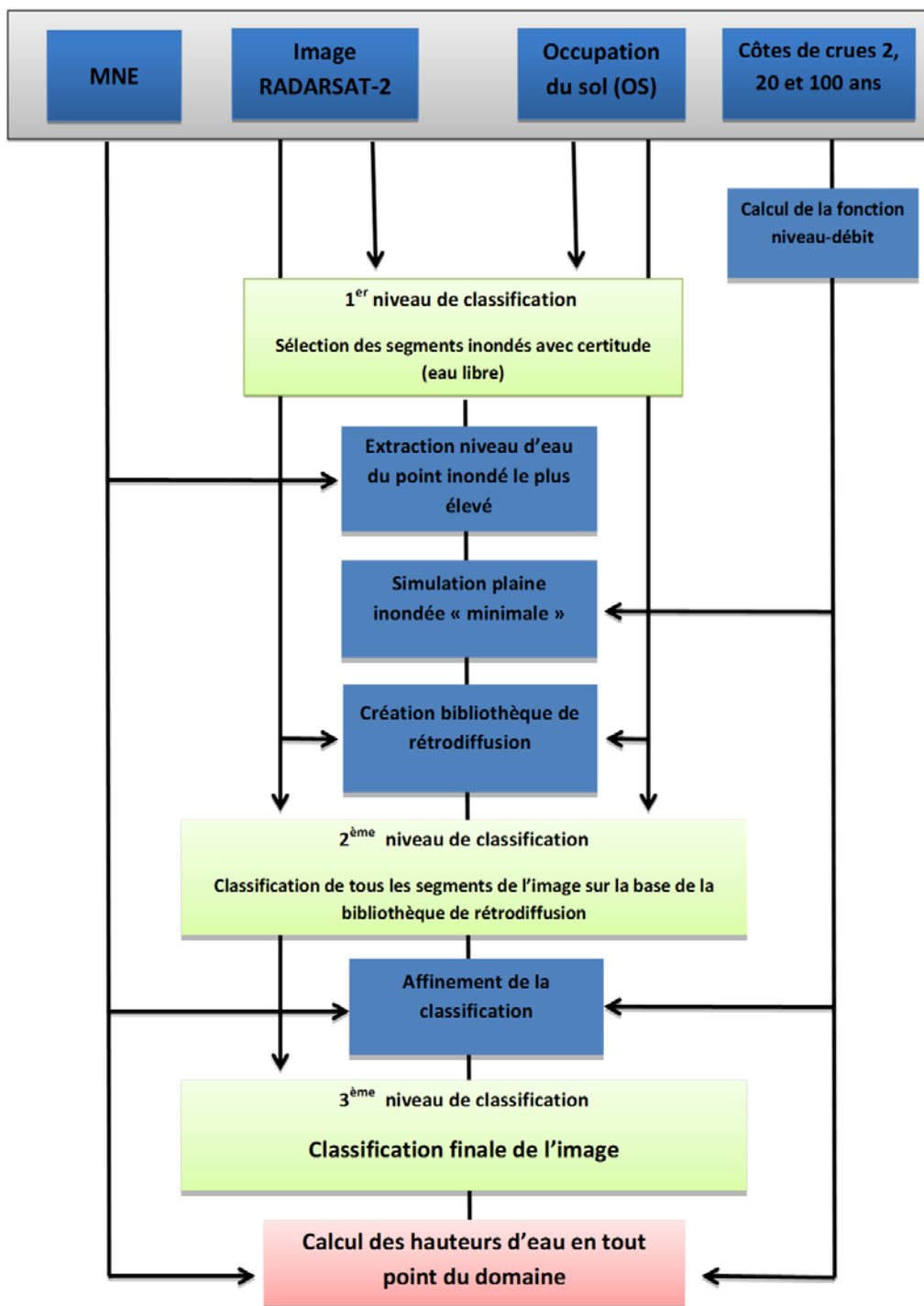


Figure 4 Organigramme méthodologique de caractérisation de l'aléa inondation

3.5.1 Création de la fonction niveau-débit pour la zone d'étude

Les différentes étapes de la création de la fonction de régression niveau-débit utilisée dans cette étude sont détaillées dans Poulin et al. (2012) et ne sont ici présentées que de manière synthétique. La création de cette fonction est réalisée en mode pré-opérationnel et a pour but de déterminer les paramètres de la fonction niveau-débit en tout point de la région d'étude. Ces paramètres seront par la suite utilisés pour déterminer la profondeur de submersion en tout point pour un débit donné. Elle utilise en intrant des positions 3D représentant le niveau de l'eau en un point donné du domaine pour un débit donné. Ces intrants peuvent être des limites de plaines inondées connues (2, 20, 100 ans) et des profils en long. Ceux-ci seront utilisés pour générer une surface simulant le niveau d'eau correspondant à chaque débit, à l'aide d'interpolations et d'extrapolations. L'équation qui sert à déterminer les paramètres de la fonction débit-niveau en tout point de la région à l'étude est la suivante :

$$H = \alpha Q^\beta$$

où, Q , le débit, et H , la hauteur d'eau, sont connus et α et β sont des constantes à déterminer par optimisation. Il est possible de linéariser cette équation sous la forme :

$$\ln(H) = \alpha \ln(Q) + \beta$$

Cette fonction de régression est calculée pour chacune des mailles communes à toutes les surfaces d'eau. Le résultat est formé de deux matrices contenant les valeurs des paramètres α et β spécifiques à chaque maille du domaine. La connaissance des paramètres α et β permettra, une fois le niveau d'eau connu, d'extraire le débit nécessaire à l'inondation des points submergés et ainsi à simuler la plaine inondée minimale.

3.5.2 Premier niveau de classification

Données nécessaires	Images RADARSAT-2, polarisations HH et HH-HV Occupation du sol
Données de validation	Images IKONOS, WorldView et GeoEye (selon la date d'acquisition de l'image RADARSAT-2 utilisée)
Logiciels	Geomatica 2012 ou Definiens e-Cognition

L'objectif de cette seconde étape est de détecter les zones étant inondées avec certitude sur l'image RADARSAT-2. Ces zones sont celles qui présentent une réflexion spéculaire qui n'est pas typique de la réflexion de la classe d'occupation du sol à laquelle elles appartiennent.

Dans un premier temps, une segmentation orientée objet automatique de l'image pourra être réalisée, afin que les segments homogènes présents sur l'image RADARSAT-2 soient préalablement identifiés. Divers paramètres de segmentation seront évalués : les paramètres de taille et de forme, les valeurs de rétrodiffusion ou encore la texture. Cette segmentation sera réalisée sur les images en polarisation HH (orbite descendante, angle d'incidence de 23°) ainsi que sur les images en polarisation HH-HV (dont les paramètres d'acquisition en termes d'orbite, d'angle d'incidence mais aussi de résolution spatiale sont différents). Les résultats des segmentations seront validés à l'aide des images optiques de très haute résolution spatiale disponibles (IKONOS, GeoEye et WorldView).

Cette seconde étape consiste en la détection et en la classification des segments de l'image correspondant à des zones inondées en eau libre. Ces segments doivent en théorie présenter une réflexion de type spéculaire, mais ne doivent pas appartenir à la classe d'occupation du sol « eau ». Plusieurs paramètres de classification seront testés, afin de déterminer le ou les plus adaptés à la détection de ces zones inondées : les paramètres de texture (identifiés comme les plus pertinents lors de la revue de littérature), les coefficients de rétrodiffusion et, pour la polarisation HH-HV, le rapport de polarisation. L'intérêt de ces différents paramètres sera réévalué selon les caractéristiques de l'image RADARSAT-2 utilisée.

À la fin de cette étape, les zones d'eau libre inondées avec «certitude» pourront être détectées puis délimitées. Il s'agit ainsi du premier niveau de classification de l'image.

3.5.3 Délimitation de la plaine inondée minimale

Données nécessaires	Image RADARSAT-2 segmentée Segments « inondés » identifiés Modèle numérique de terrain Fonction de débit-niveau
Données de validation	Images IKONOS, WorldView et GeoEye (selon la date d'acquisition de l'image RADARSAT-2 utilisée)
Logiciels	Geomatica 2012, ArcGIS 10

L'objectif de cette troisième étape est de déterminer le débit nécessaire à l'inondation du segment classifié comme étant « inondé » au cours de l'étape précédente et ayant l'altitude la plus haute. Ce débit servira à simuler une plaine inondée minimale permettant de déterminer quels sont les segments de l'image inondés avec certitude.

Pour cela, le segment classifié comme « inondé » et ayant la plus haute élévation sur le modèle numérique de terrain est sélectionné. On extrait ensuite le point le plus haut de ce segment. Rechercher ce point revient à rechercher le point le plus haut connu comme étant inondé et suppose de ce fait que le débit durant la crue permet de submerger tout point de la zone ayant une élévation inférieure.

La fonction de niveau-débit développée dans la première étape de la méthodologie va ensuite être mise à profit pour déterminer le débit minimal pour ce point. La zone inondée sera ainsi délimitée.

3.5.4 Création de la bibliothèque de rétrodiffusions

Données nécessaires	Image RADARSAT-2 segmentée Limites de la zone inondée « minimale » Occupation du sol
Données de validation	Images IKONOS, WorldView et GeoEye (selon la date d'acquisition de l'image RADARSAT-2 utilisée)
Logiciels	Geomatica 2012, ArcGIS 10

Cette troisième étape a pour objectif de créer une bibliothèque de rétrodiffusions, contenant les informations sur la rétrodiffusion typique des différentes classes de surfaces inondées présentes sur l'image RADARSAT-2. Les informations contenues dans cette bibliothèque de rétrodiffusions permettront, avec l'occupation du sol, de classer l'ensemble des segments de l'image. Si cette méthode s'inspire directement de celle développée par (Pulvirenti et al., 2011b), son originalité réside dans le fait que la bibliothèque de signatures de rétrodiffusion est construite sur la base des informations issues de l'image elle-même, et n'utilise pas des signatures de rétrodiffusion déjà établies, considérées comme « universelles » et issues d'environnements différents.

Les signatures de rétrodiffusion des différentes classes de zones inondées seront déterminées sur la base du type d'occupation du sol des segments et de leurs caractéristiques de rétrodiffusion, qui seront évaluées à l'aide de différents paramètres (texture, ton, intensité de rétrodiffusion, etc.)

Des segments appartenant à une même classe d'occupation du sol peuvent présenter des caractéristiques de rétrodiffusion différentes. On pense, par exemple, aux milieux urbains, dont les propriétés de rétrodiffusion peuvent changer d'un endroit à un autre. Il n'est ainsi pas optimal de fixer des signatures de rétrodiffusion trop restrictives pour chaque classe. On pourrait ainsi envisager de définir des valeurs minimales et maximales définissant l'appartenance à une classe, selon les statistiques de rétrodiffusion de l'ensemble des segments de l'image appartenant à une même classe.

3.5.5 Second niveau de classification

Données nécessaires	Image RADARSAT-2 segmentée Bibliothèque de signatures de rétrodiffusion Occupation du sol
Données de validation	Images IKONOS, WorldView et GeoEye (selon la date d'acquisition de l'image RADARSAT-2 utilisée)
Logiciels	Geomatica 2012

L'ensemble des segments de l'image sont ensuite classifiés, selon leur occupation du sol et selon leur similitude à chacune des différentes signatures de rétrodiffusion définies pour chaque classe d'occupation du sol.

3.5.6 Affinement de la classification

Données nécessaires	Image RADARSAT-2 segmentée Relation niveau-débit Occupation du sol
Données de validation	Images IKONOS, WorldView et GeoEye (selon la date d'acquisition de l'image RADARSAT-2 utilisée)
Logiciels	Geomatica 2012, ArcGIS 10

Étant donné que la plaine inondée définie au cours de la deuxième étape (cf. 3.5.2) ne correspond qu'à une plaine inondée « minimale », on ne peut savoir avec certitude où se trouvent les limites de la plaine inondée maximale. Il est bien sûr possible de se baser sur les points les plus hauts des segments les plus élevés classifiés comme étant inondés, mais des erreurs de classification générées à l'étape 5 (cf. 3.5.5) pourraient fausser l'estimation de la plaine inondée maximale de plusieurs mètres. Ainsi, un affinement de cette classification s'impose. Pour cela, diverses fonctions de probabilité d'appartenance pourront être définies, sur le modèle de Macina et al. (2006) et de (Pierdicca et al., 2010). Ces fonctions d'appartenance pourraient par exemple être

relatives à l'information de contexte des segments, aux connectivités spatiale et topographique à la zone inondée, ou encore à la valeur des débits simulés pour les segments les plus éloignés de la plaine inondée « minimale » par rapport aux cotes de crues maximales établies pour la zone étudiée (ex : cote de crue de récurrence supérieure à celle de 100 ans).

3.5.7 Extraction des niveaux d'eau en tout point de la zone inondée

Données nécessaires	Image RADARSAT-2 classifiée Relation niveau-débit
Données de validation	Autres données acquises sur le terrain, Rapport de dommages, etc.
Logiciels	Geomatica 2012, ArcGIS 10

Enfin, une fois l'ensemble des segments de l'image classifiés, il est possible d'extraire le niveau d'eau maximal dans la plaine à l'aide de l'élévation maximale des segments les plus élevés inondés, à l'aide du mode opérationnel de l'outil CADYRI.

4 CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA POPULATION AUX INONDATIONS

Cette section s'attache à définir l'ensemble des concepts relatifs à la caractérisation et à l'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations. Elle permet de déterminer les dimensions de la vulnérabilité les plus pertinentes pour l'évaluation des risques humains liés aux inondations, dans un contexte de gestion de crise. Sur la base des travaux réalisés dans ce domaine et des remarques qui en sont issues, nous proposerons une méthodologie d'évaluation propre à chaque dimension de la vulnérabilité retenue. Une attention particulière sera portée à la manière de fusionner ces différentes dimensions de la vulnérabilité, pour obtenir une évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations. Si la méthodologie développée s'inscrit avant tout dans un contexte de gestion de crise, elle devrait également permettre, à terme, la réalisation de scénarios hors crise pour la préparation à la gestion de crises potentielles.

4.1 Concepts relatifs à la vulnérabilité de la population aux inondations

Une vue générale des travaux réalisés dans le domaine de la vulnérabilité de la population aux inondations est présentée dans cette section. Les concepts sur la vulnérabilité sont définis ainsi que les limites des approches existantes selon la littérature sont présentés.

4.1.1 Définition et conceptualisation de la vulnérabilité

Durant les années 1970 et jusqu'au milieu des années 1980, la vulnérabilité était souvent associée à la fragilité physique du bâti, c'est-à-dire à la probabilité qu'un bâtiment ou une structure s'effondre à cause de l'impact d'un aléa (Kienberger, 2007). Ainsi, l'évaluation des dommages matériels était au centre des analyses, et les aspects humains de la vulnérabilité n'étaient souvent pas pris en compte. Aujourd'hui cependant, le concept de vulnérabilité a évolué et intègre de nombreux aspects (Birkmann, 2007). Cette évolution peut être constatée à la lecture de la définition de la vulnérabilité donnée par les Nations Unies dans la Stratégie Internationale pour la Réduction des Désastres. Selon cette définition, la vulnérabilité peut être définie comme « les conditions ou

processus déterminés par des facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui font augmenter la sensibilité ou la prédisposition d'une communauté aux impacts d'un risque » (UN/ISDR, 2004). Ainsi, on considère maintenant la vulnérabilité comme l'ensemble des conditions d'une société ou d'éléments à risque qui déterminent le potentiel de l'aléa en termes de pertes en vie humaines ou de pertes financières mais aussi en termes de perturbation de la société.

Un plus grand intérêt est donc porté depuis quelques années à la question de la vulnérabilité des individus et des communautés, à travers leurs caractéristiques sociales et économiques. Différentes manières de considérer la vulnérabilité sociale ont ainsi émergé, et peuvent être regroupées en trois « écoles » (Rygel et al., 2006).

Dans certaines études, la vulnérabilité est considérée comme un état préexistant, résultant des caractéristiques intrinsèques à la population. Ces études se concentrent davantage sur l'exposition potentielle aux risques, et ainsi sur l'occupation humaine dans les zones à risque. Dans ce cas, c'est plus souvent le degré de pertes humaines et monétaires pouvant résulter d'un aléa particulier qui est examiné (Cutter et al., 2003).

Une vision plus évoluée de la vulnérabilité suggère que tous les individus présents dans une zone à risque ne sont pas vulnérables de la même manière à un aléa. Ainsi, pour un aléa donné, les pertes et les dommages peuvent varier grandement d'un individu ou d'un foyer à l'autre. C'est sur cette approche que les études les plus récentes portant sur la vulnérabilité humaine se sont concentrées. Selon celle-ci, la vulnérabilité de la population varie avec la capacité d'adaptation des individus lorsqu'ils sont touchés par un sinistre, qui est une combinaison de la résistance des individus (ou de leur capacité à faire face à l'aléa) et de leur résilience, qui correspond à leur capacité à se remettre des pertes ou des dommages rapidement (Birkmann, 2007; Buckle et al., 2001; Demoraes et D'Ercole, 2009). Ainsi, la vulnérabilité est considérée comme un élément construit socialement, et qui peut trouver d'une part ses origines dans le contexte économique et politique de la zone d'étude (développement institutionnel, relations sociales, pouvoir politique etc.) (Cutter et al., 2003), mais aussi dans les caractéristiques socio-économiques des individus eux-mêmes (Demoraes et D'Ercole, 2009; Hebb et Mortsch, 2007; Morin, 2008).

Il existe enfin une troisième approche, qui combine les éléments des deux premières approches. Cette autre école de pensée considère la vulnérabilité comme la réponse sociale à un risque biophysique. Ainsi, si la vulnérabilité résulte de facteurs sociaux ou économiques variant dans l'espace, elle est aussi dépendante des caractéristiques de l'aléa (Barroca et al., 2005; Clark et al., 1998; Wilhelmi et Morss; Wilhelmi et Morss, 2012). Cette approche, considérée comme plus complète et la plus réelle, est nommée « Vulnerability of places ».

4.1.2 Un manque d'analyses orientées vers la gestion de crise

La revue de littérature a permis de souligner le fait que très peu d'études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité de la population à un aléa sont menées dans le but de fournir des informations utiles à l'organisation des secours à la population en phase de gestion de crise. La majorité des études se concentrent en effet sur l'analyse des causes des désastres passés et sur la localisation des individus ou des infrastructures les plus vulnérables, afin de cibler les zones les plus à risque et ainsi de développer les politiques et mesures de réduction du risque adéquates. Elles sont ainsi plus tournées vers les phases de prévention du risque que vers la phase de gestion de crise. Ces analyses tiennent souvent compte des caractéristiques sociales et économiques de la population, mais aussi de leur environnement économique, politique et institutionnel, à une échelle d'analyse qui est souvent celle du quartier (Barroca et al., 2006; Hebb et Mortsch, 2007; Kienberger, 2007). L'aléa est considéré dans ces analyses comme un aléa « potentiel » ayant une probabilité de récurrence donnée.

En temps de gestion de crise, disposer d'informations sur la vulnérabilité sociale et économique de la population est essentiel, mais n'est pas suffisant pour obtenir une vue précise de la situation en cours. Il est en effet primordial de savoir où se situent les populations touchées, quel est le niveau d'eau dans les habitations ou encore quelles sont les infrastructures essentielles non fonctionnelles, afin de définir et de localiser avec précision les individus ayant besoin des secours (Wilhelmi et Morss, 2012). Dans ce cas, il est donc nécessaire de tenir compte des caractéristiques de la vulnérabilité, mais aussi de l'aléa.

4.1.3 Études intégrées de la vulnérabilité

Il est également intéressant de souligner le fait que, dans un très grand nombre d'études, la vulnérabilité de la population à un aléa donné est analysée et évaluée à l'aide d'indicateurs sociaux ou économiques, faisant état de sa capacité à faire face à un aléa et de sa résilience (Azar et Rain, 2007; Cutter et al., 2003; Rygel et al., 2006; Wilhelmi et Morss, 2012). Les autres éléments vulnérables aux inondations, comme les bâtiments ou les infrastructures essentielles, sont évalués à l'aide de méthodologies spécifiques (Blin et al., 2005; Jousseume et Mercier, 2009; Leclerc et al., 2003; Pageon, 2008). Ainsi, les liens permettant d'analyser l'impact de la vulnérabilité du bâti et de la vulnérabilité des infrastructures essentielles sur la vulnérabilité de la population, ne sont que rarement pris en compte.

Il n'existe ainsi que peu d'études réalisant véritablement une analyse intégrée de la vulnérabilité humaine aux inondations, tenant compte des caractéristiques socio-économiques de la population, mais aussi des effets de la vulnérabilité du bâti et de la vulnérabilité structurelle sur la vulnérabilité humaine. Seules quelques études réalisent à ce jour cette évaluation intégrée de la vulnérabilité (Każmierczak et Cavan, 2011; Messner et Meyer, 2006). On peut citer en guise d'exemple la méthode OSIRIS-risque (et OSIRIS-inondation), qui intègre la vulnérabilité des individus, la vulnérabilité des infrastructures essentielles (en particulier des réseaux), et la vulnérabilité directe (ou géographique), dans un outil d'aide à la décision en situation de crise (Morel et al., 2009).

4.1.4 Sélection des indicateurs de vulnérabilité sociale

Comme nous venons de le souligner, la vulnérabilité sociale est maintenant souvent au cœur des évaluations de la vulnérabilité aux aléas. Étant un état préexistant, elle n'a pas de rapport direct avec le type d'aléa considéré dans l'analyse. Ainsi, les indicateurs de vulnérabilité sociale diffèrent généralement peu dans la littérature. Une revue des indicateurs les plus utilisés pour mesurer la vulnérabilité sociale aux aléas naturels a été réalisée par (Cutter et al., 2003). Les traits les plus cités sont l'âge, les handicaps physiques ou mentaux, la structure familiale et le réseau social, les ressources matérielles et l'environnement bâti.

Ces indicateurs sont utilisés pour mesurer la vulnérabilité sociale à différents types d'aléas, comme les vagues de tempête (Rygel et al., 2006), les inondations (Sebald, 2010; Zhai et al., 2006) ou encore les avalanches et les glissements de terrain (Papathoma-Köhle et al., 2010).

Ces indicateurs sont souvent choisis de manière manuelle ou suite à des analyses statistiques, car ils permettent de représenter aisément la vulnérabilité sociale dans les pays développés. Cependant, dans un pays en développement ou sous-développé, les valeurs de pauvreté et de propriété ne sont pas des variables significatives, les valeurs de propriété et de revenus étant souvent faibles. Ainsi, dans les zones dont les caractéristiques sociales et économiques de la population sont différentes et où les données de recensement (utilisées pour obtenir la valeur des indicateurs au niveau local) ne sont pas disponibles, d'autres indicateurs que ceux précédemment présentés doivent être recherchés (Rygel et al., 2006).

4.1.5 L'importance de l'échelle d'analyse

Un des éléments importants liés à l'évaluation de la vulnérabilité humaine à un aléa, et qui découle du point précédent, est l'échelle spatiale à laquelle l'évaluation est réalisée.

L'analyse de quelques outils développés pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle globale, tel que le « Disaster Risk Index » (UNDP, 2004) ou encore le projet « Hotspots » (Dilley et al., 2005), a permis de souligner le fait que ces différentes approches ont avant tout pour objectif, en comparant les conséquences des désastres pour plusieurs pays, de comprendre comment le développement économique, social et politique d'un pays peut influencer sa vulnérabilité à différents types d'aléa (Peduzzi et al., 2009). Pour un même niveau d'aléa et un même niveau d'exposition dans deux pays différents, on peut ainsi comprendre quels sont les facteurs influençant le risque et cibler les besoins en matière de politique de gestion des risques. Le risque est alors considéré comme le produit de la fréquence des aléas et de leurs conséquences, et la vulnérabilité n'est caractérisée qu'à l'aide des pertes en vies humaines (Birkmann, 2007).

A l'inverse, les outils développés pour les analyses au niveau local estiment généralement que la vulnérabilité représente un risque biophysique et une réponse sociale à l'intérieur d'un domaine géographique spécifique, aux caractéristiques sociales, économiques ou institutionnelles particulières (Rygel et al., 2006). De nombreuses études ont en effet souligné le fait que l'environnement local, les

caractéristiques démographiques et les inégalités sociales et économiques créent des vulnérabilités différentielles (Buckle et al., 2001; Cutter et al., 2003; Kienberger, 2007). Ainsi, la vulnérabilité peut varier fortement entre les quartiers d'une même zone urbaine et même entre les différents foyers présents dans cette zone . Réaliser une analyse à une échelle inadaptée peut donc induire une généralisation trop importante des résultats et l'obtention de résultats non conformes à la réalité (Fekete et al., 2010). Ainsi, les analyses à l'échelle du quartier, voir même du foyer, si les données nécessaires sont disponibles, sont les plus adaptées à la mise en place de mesures de gestion de crise efficaces et aux politiques de mitigation des risques (Wilhelmi et Morss, 2012).

4.1.6 Vulnérabilité induite par le manque de ressources essentielles

Dans une étude récente (Kaźmierczak et Cavan, 2011) soulignent que certains types d'infrastructures peuvent avoir un impact négatif sur le fonctionnement des zones urbaines si elles sont affectées par l'inondation. L'inondation d'infrastructures essentielles, présentées en Annexe 2, peut être un inconvénient lors de l'inondation, mais aussi une menace importante pour la population, en particulier si le phénomène s'inscrit dans la durée (Robert et al., 2001). La défaillance de ces infrastructures essentielles, qui fournissent des ressources à la population, peut donc un être un facteur aggravant la vulnérabilité de la population. Ce constat est appuyé par (Pageon, 2008), qui présente une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'une MRC face à la défaillance des ressources produites par les infrastructures essentielles. Il y est fait état des conséquences potentielles de la défaillance ou de la destruction des infrastructures essentielles pour la population, selon le type de ressource et selon la durée de la défaillance. Les conclusions de ces études permettent ainsi de souligner l'importance de tenir compte de la défaillance ou de la destruction des infrastructures essentielles dans l'analyse du risque. Cependant, si ces études apportent des leçons importantes en matière de sécurité civile, elles ne permettent pas de faire le lien entre la vulnérabilité des infrastructures essentielles lors de l'inondation et la vulnérabilité humaine pour la gestion de l'urgence, et restent ainsi très théoriques (Chakraborty et al., 2005).

Il est également important de comprendre que le manque d'une ressource essentielle a des conséquences qui peuvent s'aggraver dans la durée (Pageon, 2008). Par exemple, la perte d'une ressource en eau potable peut être triviale durant une heure ou deux, mais sur une période étendue, elle a le potentiel d'affecter toute la population de

manière critique (DHS 2000). La gestion de crise doit donc intégrer la notion d'évolution temporelle de la vulnérabilité induite par le manque d'une ressource essentielle, qui peut faire évoluer les besoins en matière de secours.

4.1.7 La vulnérabilité du bâti

Enfin, nous nous sommes interrogés sur l'effet que peut avoir l'inondation du bâti sur la vulnérabilité de la population au cours de l'inondation. Force est de constater que si la vulnérabilité du bâti a été pendant longtemps au centre des analyses du risque d'inondation, elle n'est actuellement pas prise en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité de la population. Les quelques études intégrant les caractéristiques des bâtiments résidentiels considèrent avant tout le bâti comme un indicateur de richesse ou de pauvreté de la population. Ainsi (Wilhelmi et Morss, 2012), dans une étude réalisée aux Royaume-Uni, concluent que les maisons en « terrasse », typiques dans les quartiers ouvriers, sont un indicateur de revenus modestes alors que les maisons individuelles avec un étage ou plus sont un indicateur de revenus plus élevés. L'environnement bâti est ainsi considéré comme un indicateur de vulnérabilité intrinsèque, et pas comme un indicateur d'exposition de la population lors de l'inondation.

Les remarques issues de la revue de littérature nous ont permis de souligner les points les plus intéressants pour la définition d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des populations aux inondations. La nécessité de réaliser une analyse intégrée de la vulnérabilité apparaît ainsi comme un élément central. Si la vulnérabilité intrinsèque sert de base à l'évaluation de la vulnérabilité de la population, des éléments tels que la vulnérabilité induite par la vulnérabilité des infrastructures essentielles doivent également être intégrés. Les notions d'échelle d'analyse, et de sélection des indicateurs socio-économiques permettant de réaliser une analyse adaptée aux caractéristiques de la zone d'étude, ont également été mises en relief. Enfin, la question de l'effet de la vulnérabilité du bâti sur la population a été soulevée et ouvre de nouvelles perspectives d'analyse.

4.2 Méthodologies d'évaluation des différentes dimensions de la vulnérabilité de la population aux inondations

Les remarques issues de la revue de littérature ont permis de définir les aspects de la vulnérabilité les plus pertinents pour les objectifs de cette étude. Deux dimensions de la vulnérabilité ont ainsi été identifiées (Figure 5). Il s'agit de la vulnérabilité directe qui englobe les éléments influençant directement la vulnérabilité de la population durant la crise, à savoir sa vulnérabilité intrinsèque (correspondant à ses caractéristiques socio-économiques) et les caractéristiques des bâtiments dans lesquels les individus se trouvent lors de l'inondation. La vulnérabilité indirecte est quant à elle constituée de la vulnérabilité structurelle, qui permet de définir le niveau de vulnérabilité induit par le manque d'une ou de plusieurs ressources essentielles (eau, électricité, accès à une route, etc.).

Nous présentons maintenant les orientations méthodologiques propres à chaque aspect de la vulnérabilité identifié précédemment. L'objectif est de développer une méthodologie d'évaluation propre à chacun de ces aspects et de réfléchir aux influences que peuvent avoir la vulnérabilité du bâti et la vulnérabilité structurelle sur la vulnérabilité intrinsèque et à la manière d'évaluer ces influences. La figure 6 présente une vue schématique de ces méthodologies, qui seront décrites brièvement par la suite.

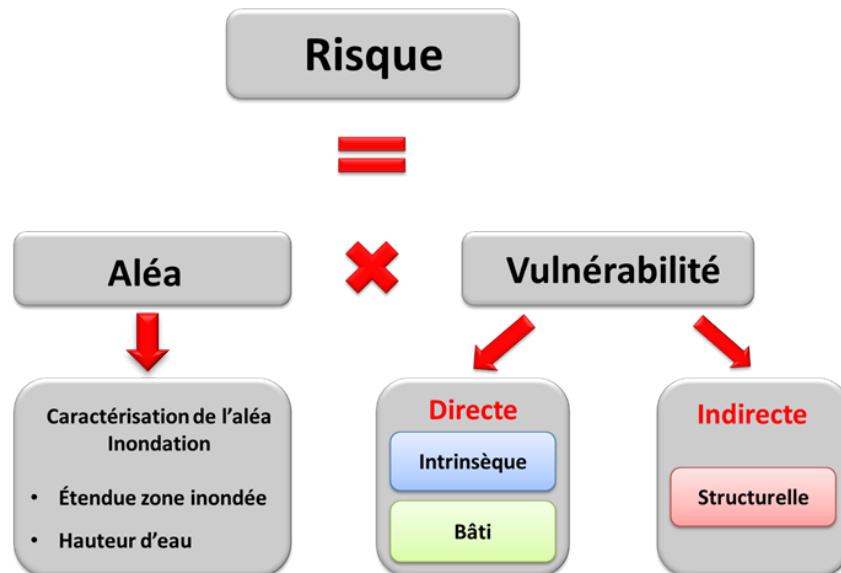


Figure 5 Caractéristiques de l'aléa et de la vulnérabilité retenues pour cette étude

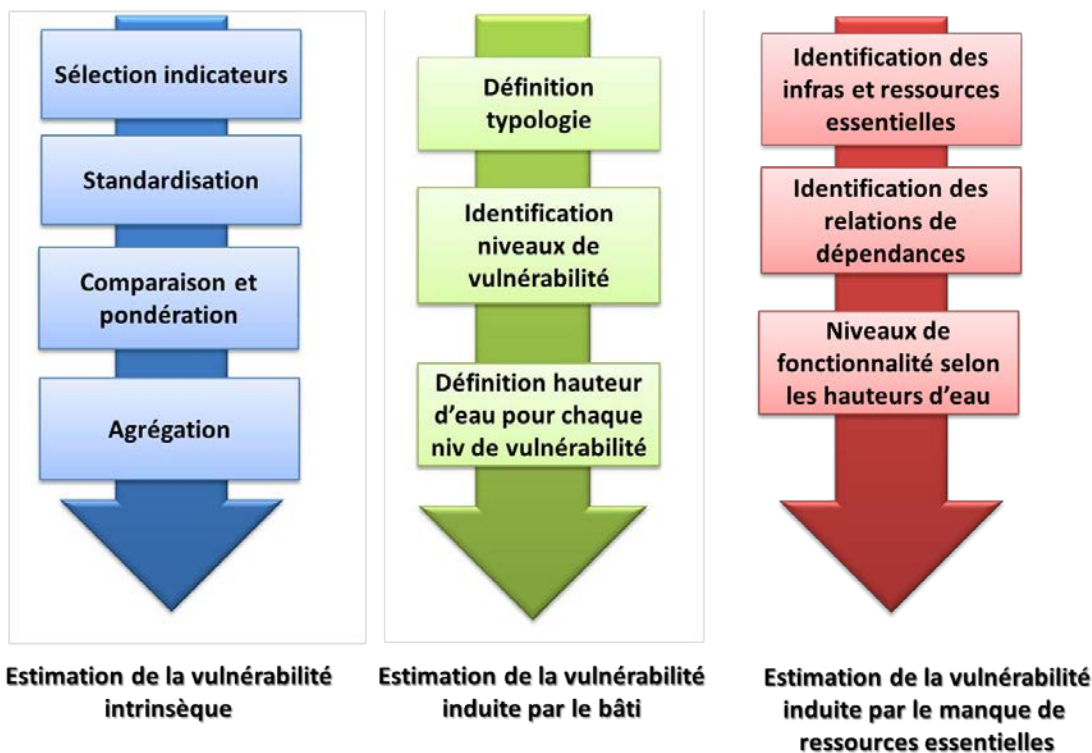


Figure 6 Vue schématique des méthodologies d'évaluation des différents aspects de la vulnérabilité humaine

4.2.1 Évaluation de la vulnérabilité intrinsèque

La méthodologie qui est ici proposée a pour objectif de déterminer le niveau de vulnérabilité intrinsèque de la population dans une zone d'étude, à l'aide des données issues du recensement le plus récent. Il est important de souligner que ces données ne sont généralement pas disponibles pour chaque foyer, mais qu'elles sont exprimées par aire de diffusion, regroupant entre 400 et 700 personnes. La méthodologie proposée est composée de 4 étapes.

Sélection des indicateurs

La revue de littérature a permis de dresser une liste complète d'indicateurs socio-économiques pouvant être utilisés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de la population aux inondations (Figure 7). Ces indicateurs étant nombreux et parfois redondants, les inclure tous ne serait pas pertinent et pourrait complexifier l'analyse.

Ainsi, il est important de ne sélectionner que les indicateurs de cette liste les plus représentatifs des caractéristiques sociales et économiques de la zone d'étude. Ce choix peut être réalisé avec l'aide des experts en gestion de crise, qui savent par expérience quelles sont les populations les plus vulnérables lors d'une inondation. Ces indicateurs doivent être exprimés dans une unité commune, à savoir le pourcentage de la population totale correspondant à cet indicateur, par aide de diffusion recensement de Statistique Canada.

Indicateurs de vulnérabilité socio-économique
Personnes âgées
Jeunes
Handicapés physiques ou mentaux
Genre (Femmes)
Chômage
Isolement physique
Classe sociale
Origine ethnique, religion
Langue
Familles monoparentales
Familles élargies
Propriétaire, locataire
Niveau d'éducation, illettrés
Personnes en transit, touristes

Figure 7 Indicateurs de vulnérabilité socio-économique relevés dans la littérature

Standardisation des données

De plus, et comme suggéré dans (Sebald, 2010), il peut être avantageux pour l'analyse d'exprimer ces valeurs sous forme de classes, même si cela induit une certaine part d'incertitude dans les résultats. Une échelle à 4 niveaux (vulnérabilité mineure, sérieuse, sévère et très sévère), issue des travaux de (Robert et al., 2001), et qui est également utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité structurelle, peut être mise à profit.

Il est possible de différencier ces classes selon une proportion statistique de la population, et cela pour l'ensemble des indicateurs de vulnérabilité intrinsèque. Il demeure cependant intéressant, sinon indispensable de discuter de la définition de ces seuils avec les experts en sécurité publique.

Importance relative des indicateurs et pondération

Tous les indicateurs sélectionnés dans cette étude ne revêtent pas la même importance dans leur capacité à estimer la vulnérabilité intrinsèque. Il peut donc être nécessaire, après les avoir sélectionnés et standardisés, d'attribuer un poids à chaque indicateur. Nous suggérons ici d'utiliser la méthode d'analyse multicritères développée par Saaty (1977), qui propose une approche de comparaison par paire relativement simple. Cette approche consiste à comparer chaque indicateur avec un autre à l'intérieur d'une matrice, et d'attribuer à chaque paire un coefficient de comparaison, représentant des niveaux d'importance allant de « Peu important » à « Extrêmement important ». Cette échelle numérique est ensuite utilisée pour évaluer l'importance de chaque indicateur de vulnérabilité intrinsèque par rapport à l'ensemble des indicateurs sélectionnés pour l'étude. Ces valeurs permettront de calculer le poids de chaque indicateur, par la résolution du problème des vecteurs propres (Conchita et Kêdowidé, 2010).

L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé à 1.0. Plus la valeur du poids de l'indicateur est proche de 1, plus l'indicateur est important dans le calcul de la vulnérabilité intrinsèque.

Agrégation des données

La dernière étape de cette analyse consiste en l'agrégation des données pondérées issues de chaque indicateur. Les poids attribués à chaque indicateur sont multipliés par la valeur de chaque indicateur, puis l'ensemble des valeurs obtenues sont additionnées. Les résultats issus de l'agrégation des données permettent ainsi de déterminer le niveau de vulnérabilité intrinsèque pour chaque aire d'analyse.

L'approche présentée comporte une forte part de suggestivité, notamment aux étapes de sélection des indicateurs et de pondération de ces indicateurs. N'ayant pas les connaissances requises pour réaliser de manière fiable ces deux étapes, nous avons créé des questionnaires, qui seront adressés aux divers responsables et gestionnaires en sécurité publique locale et/ou provinciale, dans le but de nous fournir des

informations plus précises sur les indicateurs les plus pertinents et sur la pondération de ces indicateurs, en prenant pour exemple une municipalité québécoise de taille moyenne comme celle de Saint-Jean-sur-Richelieu. Le questionnaire créé pour l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque est présenté en annexe 3.

4.2.2 Évaluation de la vulnérabilité du bâti

Le développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité du bâti a pour objectif de définir, pour chaque type de bâtiment, quel est la hauteur d'eau permettant d'évaluer l'exposition des individus à l'aléa en cours et quel est le niveau de risque induit pour la population. Il permet ainsi de déterminer quels sont les foyers les plus vulnérables affectés par l'inondation et pouvant nécessiter une évacuation prioritaire.

L'évacuation d'une résidence peut se faire selon plusieurs critères, comme la perte de certaines fonctionnalités de la résidence (par exemple, l'absence prolongée de chauffage), une submersion importante ou une submersion importante à venir, ou encore l'isolement du bâtiment (chemins d'accès coupés). Étant donné que nous n'avons pas l'entière maîtrise des règles d'évacuation établies par les municipalités et les gestionnaires en sécurité publique, dresser une typologie du bâti permettant d'estimer la vulnérabilité de la population selon les hauteurs d'eau n'a pour le moment pas été possible. Deux critères pourraient cependant être adaptés à cette analyse :

- La hauteur du premier plancher de l'habitation par rapport au niveau du terrain, permettant de déterminer si le premier plancher du bâtiment est inondé ou non.
- Le type de construction de l'habitation, et en particulier les roulottes ou maisons mobiles, peu résistantes à l'eau et à l'humidité.

La définition des niveaux de vulnérabilité de la population induits par la vulnérabilité du bâti est également en question. Il ne semble en effet pas possible d'utiliser l'échelle de vulnérabilité à 4 niveaux définie par (Robert et al, 2001) servant à exprimer les niveaux de vulnérabilité indirecte et intrinsèque, puisque le but est de savoir si le bâtiment est inondé ou pas. Une solution pourrait être d'augmenter le niveau de vulnérabilité intrinsèque au niveau supérieur quand le bâtiment est inondé. Par exemple, si le niveau de vulnérabilité intrinsèque des résidents est « sévère » et que le premier plancher de la maison est inondé, le niveau de vulnérabilité humaine devient « Très Sévère ».

Une fois la typologie du bâtiment définie, il sera nécessaire de définir les hauteurs d'eau minimales nécessaires à l'inondation du premier plancher et permettant de déterminer le niveau de vulnérabilité induit.

4.2.3 Évaluation de la vulnérabilité structurelle

La vulnérabilité structurelle est liée aux dysfonctionnements ou à la destruction des infrastructures dites essentielles.

Ces perturbations ont souvent des effets sociaux et économiques néfastes, en particulier sur le long terme, et peuvent faire augmenter la vulnérabilité globale de manière significative (Nicholls et Small, 2002). A l'extrême, des pertes en vies humaines peuvent survenir. Il est donc important d'identifier l'ensemble des infrastructures et services essentiels présents dans une zone à risque, de localiser la population desservie par ces infrastructures mais aussi et surtout de définir quelles pourraient être les conséquences du dysfonctionnement d'une ou de plusieurs de ces infrastructures essentielles pour la population, à plus ou moins long terme. Ces relations de dépendance et d'interdépendance entre infrastructures essentielles mais aussi entre les infrastructures essentielles et la population qui utilise leurs ressources constituent des relations de vulnérabilité directe et de vulnérabilité indirecte (Figure 8) (Bouchon, 2006).

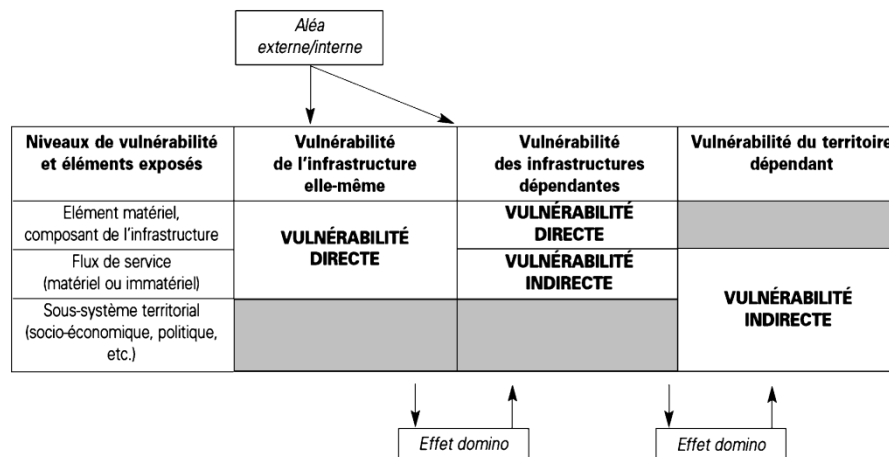


Figure 8 Vulnérabilités des infrastructures essentielles (Bouchon, 2006)

Les orientations méthodologiques qui sont ici présentées se basent en grande partie sur une série de travaux portant sur l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles (Petit, 2009) et sur les défaillances au sein de réseaux interdépendants (Debernard, 2011; Demoraes, 2004). Les travaux de Pagon (2008), dont l'objectif est de développer une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'une MRC face à la défaillance des ressources essentielles, ont également été particulièrement utiles.

La méthodologie développée se décompose en sept points.

1. Localisation des infrastructures essentielles

Il est nécessaire, en premier lieu, d'identifier et de localiser les infrastructures fournissant des ressources essentielles à la population présente dans la zone d'étude. Leur identification peut être réalisée à partir de la liste des infrastructures essentielles émise par le ministère de la Sécurité Publique du Québec et servant de base de référence au niveau national. La localisation de chaque infrastructure essentielle peut être facilitée par l'utilisation du Code d'Évaluation Foncière du Québec, dans lequel chaque type d'infrastructure est désigné par un numéro, selon sa fonction.

2. Priorisation des infrastructures essentielles

Toutes les infrastructures essentielles n'ont pas la même importance en matière de gestion de crise. La destruction d'une usine de filtration (eau potable) peut par exemple être plus dommageable à la population que la perte d'une infrastructure électrique. Il peut donc être nécessaire de prioriser certaines infrastructures essentielles, afin de mieux évaluer l'impact de leur dégradation sur la population.

3. Identification des services fournis par chaque infrastructure essentielle

Chaque infrastructure essentielle regroupe un nombre de fonctions précises qui permettent son bon fonctionnement, mais qui fournissent également des services et des ressources à la population. La perturbation d'une de ces fonctionnalités peut avoir des conséquences sur une autre fonctionnalité, mais aussi sur la population. Il est donc important d'établir l'ensemble de ces fonctionnalités.

4. Identification des relations de dépendance entre les infrastructures essentielles

Étant donné que les infrastructures ou ressources essentielles forment un système, l'évaluation des conséquences de l'aléa inondation doit être réalisée sur l'ensemble du réseau. Il est donc nécessaire d'intégrer à l'analyse les relations entre les différentes infrastructures, c'est-à-dire leurs relations de dépendance et d'interdépendances. Cette étape, bien que complexe, est indispensable, car elle aide à comprendre et à déterminer les « effets domino » découlant de l'inondation de certaines infrastructures et les désorganisations ou conséquences engendrées, pour un niveau d'eau donné. L'accessibilité à ce genre de données est cependant souvent difficile, car elles sont jugées « sensibles » (Debernard 2011).

5. Identification de la population dépendante de chaque ressource essentielle

L'étape suivante de la méthodologie consiste à localiser la population utilisant chaque ressource essentielle, ou à plus grande échelle, les quartiers utilisant les services fournis par chacune de ces infrastructures.

6. Création des courbes fonctionnelles de défaillance

Chaque service fourni par une infrastructure essentielle peut être affecté de manière différente par la montée des eaux. Il est donc nécessaire de définir à partir de quelle hauteur d'eau le niveau de fonctionnalité d'un service change (Robert et al., 2001; Petit 2009). La livraison d'un service ou d'une ressource peut être caractérisée selon deux états : défaillant et non fonctionnel. Les seuils de dégradation et de défaillance doivent donc être identifiés selon les paramètres établis par les utilisateurs, pour chacune des fonctionnalités de la ressource. Le niveau de fonctionnalité peut par exemple être considéré comme « défaillant » quand les ressources et services fournis à la population sont perturbés. Le niveau « non fonctionnel » peut être atteint quand plus aucun des services ne peut être fourni à la population et que l'infrastructure est mise hors service.

7. Création de courbes de conséquences

Enfin, la destruction ou la défaillance d'une ou de plusieurs infrastructures essentielles aura des conséquences sur la population. Son degré d'exposition et ainsi sa vulnérabilité indirecte, sera fonction du nombre de ces éléments touchés par une

inondation. Les règles d'évaluation du degré d'exposition peuvent être les suivantes (Robert et al., 2001) :

- Si tous les éléments assurent normalement la fourniture des ressources, le degré d'exposition de la population utilisant les ressources est mineur.
- Si un élément n'assure plus la fourniture des ressources, le degré d'exposition de la population utilisant les ressources est sérieux.
- Si au moins trois éléments n'assurent plus la fourniture des ressources, le degré d'exposition de la population utilisant les ressources est sévère.
- Si plus de trois éléments n'assurent plus la fourniture des ressources, le degré d'exposition de la population utilisant les ressources est très sévère.

Pour les infrastructures ayant reçu un degré de priorisation, les règles d'évaluation du niveau de vulnérabilité indirecte varient. Elles considèrent l'importance relative de ces réseaux, telle qu'établie avec les responsables municipaux, et peuvent comprendre plusieurs volets. Nous utilisons ici, en guise d'exemple, les réseaux de support à la vie (Tableau 3).

Tableau 3 Niveau de vulnérabilité indirecte de la population selon les infrastructures essentielles touchées

Éléments touchés	Niveau de vulnérabilité indirecte de la population
Aucun élément touché	Mineur
Éléments relatifs à l'électricité, au gaz ou au pétrole	Sérieux
Usine de filtration (eau potable)	Sévère
Usine de traitement (eau usée)	Très Sévère
Si pour un même niveau d'eau, deux degrés d'exposition peuvent être établis	Degré le plus sévère est conservé

Au final, pour chaque hauteur d'eau, il est possible d'établir les conséquences de l'inondation sur les infrastructures essentielles, sur les ressources essentielles fournies et ainsi, sur la vulnérabilité indirecte de la population. Un élément important de cet aspect de la vulnérabilité indirecte n'a pu être introduit, faute de références méthodologique fiables. Il s'agit de la notion temporelle, un facteur pouvant aggraver la vulnérabilité indirecte de la population. Ce point devra être donc être discuté avec les responsables de la Sécurité Civile.

Enfin, il est important de souligner que cette approche méthodologique est complexe, et nécessite un grand nombre de données parfois difficiles à obtenir. Les premiers essais méthodologiques se sont donc concentrés sur une des infrastructures essentielles dont les données sont faciles d'accès : le réseau routier (Figure 10).

4.2.4 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations

Enfin, il a été nécessaire de réfléchir à la manière de fusionner les méthodologies d'évaluation des différentes dimensions de la vulnérabilité, afin d'obtenir une évaluation finale de la vulnérabilité de la population, selon les caractéristiques de l'inondation en cours.

Une méthode simple peut être proposée. On évalue dans un premier temps la vulnérabilité directe de la population, en prenant pour base le niveau de vulnérabilité intrinsèque calculé et en y ajoutant un niveau supérieur si le bâtiment dans lequel se trouvent les individus est inondé. On compare ensuite le niveau de vulnérabilité indirecte avec celui de la vulnérabilité directe. Le niveau le plus élevé des deux est retenu comme niveau de vulnérabilité de la population. La figure 9 schématise cette méthodologie.

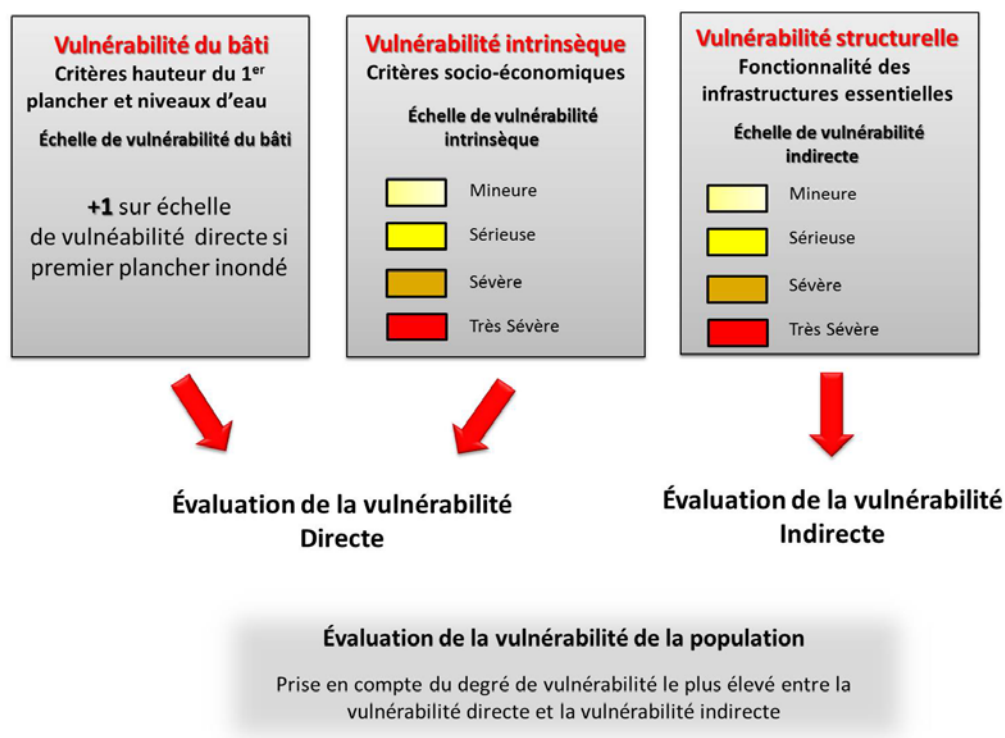


Figure 9 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations

Les travaux réalisés dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations ont permis de distinguer deux dimensions de cette vulnérabilité : la vulnérabilité directe, composée de la vulnérabilité intrinsèque et de la vulnérabilité du bâti, et la vulnérabilité indirecte, composée de la vulnérabilité structurelle. Des méthodes d'évaluation propre à chaque dimension de la vulnérabilité ont été définies ou sont en construction.

De nombreuses améliorations restent encore à réaliser afin que ces méthodes soient intégrables à un outil opérationnel de caractérisation et d'évaluation en temps quasi-réel du risque d'inondation en milieu urbain. Ces améliorations devront se faire, entre autres, à l'aide de l'expertise des gestionnaires en sécurité civile au niveau local et provincial.

5 CONCLUSION

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode de caractérisation et d'évaluation en temps quasi-réel du risque d'inondation en milieu urbain. Afin de répondre à cet objectif, les deux composantes du risque, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, sont intégrées à l'étude, et sont traitées de manière approfondie.

Dans un premier temps, une méthodologie de caractérisation de l'aléa inondation, mettant à profit les capacités de l'imagerie RADARSAT-2 de haute résolution spatiale, a été proposée. L'objectif de cette méthode est de permettre la délimitation des zones inondées puis l'extraction des hauteurs d'eau en tout point de ces zones, avec une précision centimétrique. Une attention particulière est portée à l'automatisation de la méthodologie et aux temps de traitement, afin d'intégrer cette méthodologie à un outil opérationnel en phase de gestion de crise.

Parallèlement, une méthodologie de caractérisation et d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations a été développée. Cette méthode intègre différentes dimensions de la vulnérabilité, à savoir la vulnérabilité intrinsèque, la vulnérabilité fonctionnelle et la vulnérabilité du bâti. Une fois les hauteurs de submersion connues en tout point de la zone inondée, la méthode finale permet d'obtenir une évaluation de la vulnérabilité humaine à l'aléa inondation, à l'échelle du foyer. Cette approche méthodologique, dont les bases ont été définies, nécessitera des ajustements aux étapes de sélection des variables et aux étapes de définition des hauteurs d'eau permettant le franchissement de chaque niveau de vulnérabilité. Ces ajustements seront faits après concertation avec les responsables de la sécurité civile aux niveaux local et/ou provincial.

Une fois validées et opérationnelles, les méthodologies de caractérisation de l'aléa inondation et d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations seront fusionnées puis intégrées au sein d'un même outil. Cette fusion est possible grâce à l'élément commun aux deux méthodologies : les hauteurs d'eau. L'outil final permettra d'obtenir une évaluation en temps quasi-réel du risque humain lors d'une inondation, offrant une capacité d'analyse à l'échelle du foyer. Il constituera un support opérationnel solide pour la prise de décision lors de la phase de gestion de crise.

La figure 10 présente un aperçu des résultats escomptés. Dans cet exemple, on voit que le niveau de risque varie d'un bâtiment résidentiel à un autre. Ce niveau de risque a été estimé en fonction des hauteurs d'eau simulées dans la zone, du type de bâtiment inondé, des caractéristiques socio-économiques des résidents, mais aussi en fonction de l'accès ou non à une route, considérée comme infrastructure essentielle en situation d'urgence.

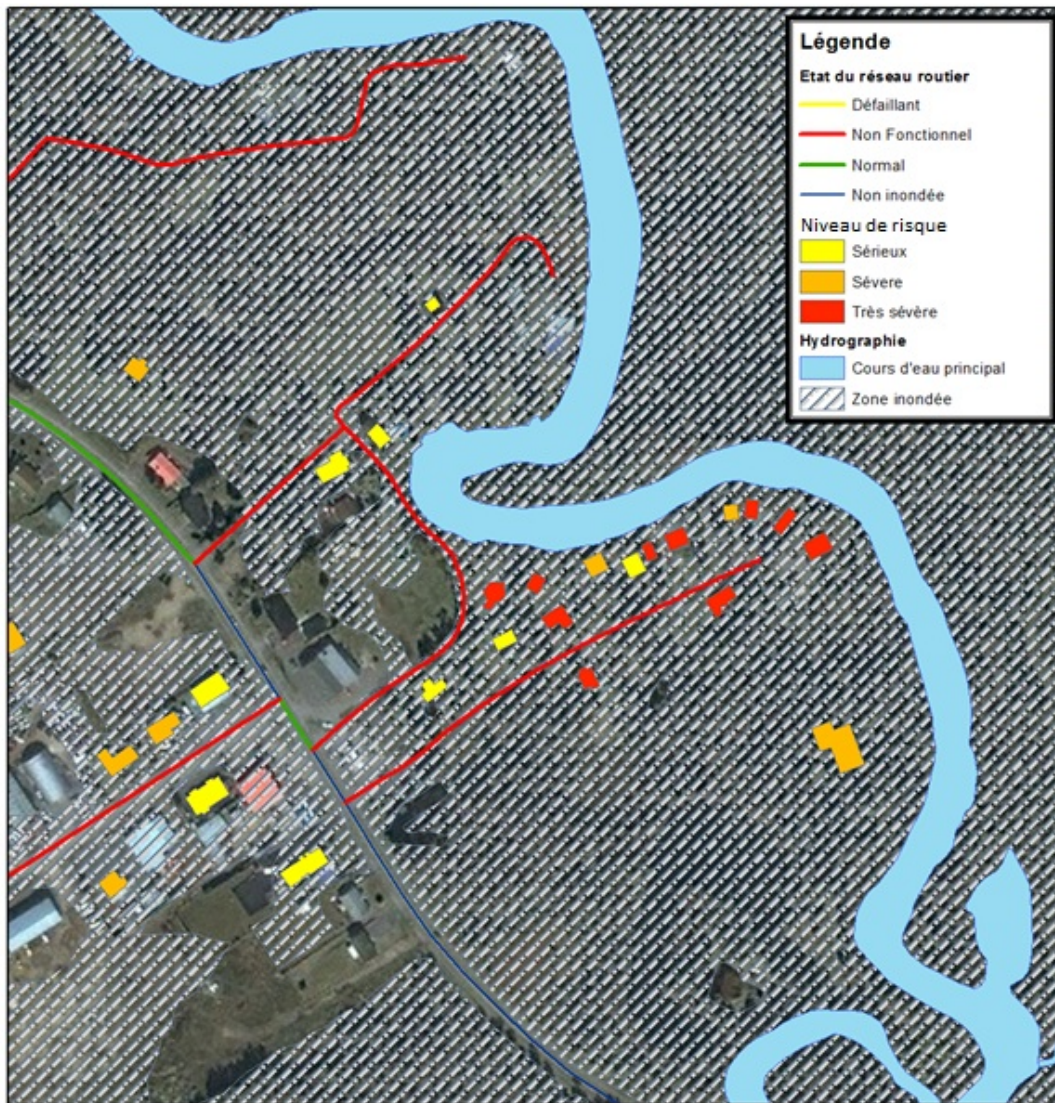


Figure 10 Exemple de résultats produits par l'outil de caractérisation et d'évaluation du risque d'inondation en milieu urbain

L'originalité de ce travail repose sur le fait que, pour la première fois, la caractérisation de l'aléa inondation à l'aide de l'imagerie radar satellitaire RADARSAT-2 et l'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations sont fusionnées en un seul et même outil, permettant d'obtenir une évaluation du risque humain aux inondations selon les caractéristiques d'une inondation en cours.

Dans le domaine de la caractérisation de l'aléa inondation, une des originalités de ce projet réside dans les outils utilisés. Cette étude constitue en effet la première opportunité de tester et d'évaluer les capacités de l'imagerie RADARSAT-2 (bande C) de haute résolution spatiale pour la délimitation des inondations en milieu urbain. C'est également la première fois que le potentiel de la polarisation HH-HV en bande C sera évalué pour la détection des surfaces urbaines inondées, selon différents paramètres d'acquisition (angle d'incidence, orbite).

De même, l'intégration d'une relation niveau-débit à la méthodologie de détection des zones inondées par imagerie radar satellitaire est une première. La méthodologie proposée tire également profit de diverses approches développées dans des travaux antérieurs, telles que la segmentation orientée objet, l'utilisation de signatures spectrales de référence ou encore la logique floue, jugées porteuses, mais qui n'ont jamais été utilisées sous la forme présentée dans cette étude.

De même, il est important de souligner que l'intégration de plusieurs dimensions de la vulnérabilité au sein d'une même méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la population aux inondations est un élément novateur. Alors que la plupart des études n'intègrent que les dimensions sociales ou économiques de la vulnérabilité, nous intégrons également les notions de vulnérabilité fonctionnelle et de vulnérabilité du bâti à l'analyse de la vulnérabilité humaine. Enfin, les différents niveaux de vulnérabilité humaine sont exprimés en fonction des hauteurs de submersion dans la zone d'étude, ce qui permet une mise en relation directe avec les caractéristiques de l'inondation en cours.

Enfin, la publication de trois articles est prévue dans le cadre de ce projet doctoral. Les thèmes de ces articles correspondront aux différentes parties du projet. Le premier article portera ainsi sur la méthodologie de caractérisation et d'évaluation de la vulnérabilité humaine aux inondations développée. Le deuxième article sera consacré à

la délimitation des zones urbaines inondées avec des données de très haute résolution spatiale en bande C et sur l'apport de la polarisation HH-HV pour la détection des zones inondées. Enfin, le dernier article présentera l'outil final de caractérisation et d'évaluation en temps quasi-réel du risque d'inondation en milieu urbain.

6 ÉCHÉANCIER

Le tableau ci-dessous présente le plan de travail proposé pour mener à bien ce projet doctoral.

Tableau 4 Échéancier proposé pour la réalisation du projet de doctorat

Travaux	Aut. 2012	Hiv. 2013	Été 2013	Aut. 2013	Hiv. 2014	Été 2014	Aut. 2014
Caractérisation de l'aléa	✓	✓	✓	✓	✓		
Évaluation de la vulnérabilité		✓	✓	✓			
Caractérisation du risque					✓	✓	
Cours		✓					
Article 1 (Vulnérabilité)			✓				
Article 2 (Aléa)					✓		
Article 3 (Risque)						✓	
Mini-projet 1		✓					
IGARSS 2014						✓	
Rédaction Thèse							✓

7 RÉFÉRENCES

- Ahtonen, P., Hallikainen, M., 2005. Automatic detection of water bodies from spaceborne SAR images. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2005, Seoul, pp. 3845-3848.
- André, G., Guillaude, R., Bahoken, F., 2002. Flood mapping using spatial radar and optical imagery and digital elevation model: Limits and capacities. Cartographie des zones inondées par imagerie spatiale radar, optique et modèles numériques de terrain: capacités et limites illustrées par des exemples en France (Aude 1999) et à l'étranger (Honduras 1998, Venezuela 1999 et Madagascar 2000)(1): 49-54.
- Andreoli, R., Yesou, H., 2007. Large scale change detection techniques dedicated to flood monitoring using ENVISAT wide swath mode data, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, pp. 2382-2385.
- Angiati, E. et al., 2010. Operational evaluation of damages in flooded areas combining Cosmo-Skymed and multispectral optical images, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, pp. 2414-2417.
- Azar, D., Rain, D., 2007. Identifying population vulnerable to hydrological hazards in San Juan, Puerto Rico. GeoJournal, 69(1): 23-43.
- 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.
- Barroca, B., Bernardara, P., Mouchel, J.M., Hubert, G., 2006. Indicators for identification of urban flooding vulnerability. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6(4): 553-561.
- Barroca, B., Pottier, N., Lefort, E., 2005. Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge Aval, Actes des septièmes rencontres de TheoQuant, Atelier 3 "Risques, Vulnérabilité", Besançon.
- Bates, P.D. et al., 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.
- Birkmann, J., 2007. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. Environmental Hazards, 7(1): 20-31.
- Blin, P., Leclerc, M., Secreta, 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.
- Boni, G. et al., 2009. The OPERA project: EO-based flood risk management in Italy, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, pp. II-929-II-932.

- Boni, G. et al., 2007. High resolution COSMO/SkyMed SAR data analysis for civil protection from flooding events, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, pp. 6-9.
- Bonn, F., Dixon, R., 2005. Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with RADARSAT-1 data. *Natural Hazards*, 35(3): 377-393.
- Bonn, F., Rochon, G., française, A.d.u.p.o.e.d.l., UREF., 1996. Précis de télédétection: Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec.
- Bouchon, S., 2006. Application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques. *Responsabilité et Environnement*, 43.
- Brisco, B. et al., 2008. Water resource applications with RADARSAT-2 – a preview. *International Journal of Digital Earth*, 1(1): 130-147.
- Brivio, P.A., 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.
- Buckle, P., Marsh, G., Smale, S., 2001. Assessment of personal and community resilience and vulnerability - Principles, Strategies and Actions, Department of Human Services, Victoria, Australia.
- Calabresi, G., 1996. The use of ERS data for flood monitoring: An overall assessment. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP(383): 237-241.
- Chakraborty, J., Tobin, G., Montz, B., 2005. Population Evacuation: Assessing Spatial Variability in Geophysical Risk and Social Vulnerability to Natural Hazards. *Natural Hazards Review*, 6(1): 23-33.
- 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, JURSE 2011, Munich, pp. 281-284.
- Clark, G. et al., 1998. Assessing the Vulnerability of Coastal Communities to Extreme Storms: The Case of Revere, MA., USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3(1): 59-82.
- Conchita, M., Kêdowidé, G., 2010. Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. *Vertigo*, 10(2): 20.
- 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.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., Shirley, W.L., 2003. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2): 242-261.
- Debernard, C., 2011. Défaillances au sein de réseaux interdépendants: les défis de la mise en place d'un système d'alerte précoce, École Polytechnique de Montréal, 95 pages pp.
- Dellepiane, S., Angiati, E., Vernazza, G., 2010. Processing and segmentation of COSMO-SkyMed images for flood monitoring, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, pp. 4807-4810.

- Dellepiane, S., Bo, G., Monni, S., Buck, C., 2000. SAR images and interferometric coherence for flood monitoring, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, pp. 2608-2610 vol.6.
- Demoraes, F., 2004. Mobilité, Enjeux et Risques dans le District Métropolitain de Quito, Équateur, Université de Savoie, Chambéry-Annecy, 587 pages pp.
- Demoraes, F., D'Ercole, R., 2009. Risques et accessibilité des lieux dans le District Métropolitain de Quito (Équateur). Mappemonde, 95(3): 20.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P.D., 2009. A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. Journal of Hydrology, 367(3-4): 276-282.
- Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., 2005. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. Disaster Risk Management Series N°5. The World Bank and Columbia University, 132 p pp.
- Estupina Borrell, V., 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France, Institut National Polytechnique de Toulouse, 254 pages pp.
- Evans, T.L., Costa, M., Telmer, K., Silva, T.S.F., 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.
- Fekete, A., Damm, M., Birkmann, J., 2010. Scales as a challenge for vulnerability assessment. Natural Hazards, 55(3): 729-747.
- 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.
- Gan, T.Y., Zunic, F., Kuo, C.C., Strobl, T., 2012. Flood mapping of Danube River at Romania using single and multi-date ERS2-SAR images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 18(0): 69-81.
- Giordano, F., Goccia, M., Dellepiane, S., 2005. Segmentation of coherence maps for flood damage assessment, Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on, pp. II-233-6.
- Giustarini, L. et al., 2011. Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: A case study. Hydrology and Earth System Sciences, 15(7): 2349-2365.
- Hahmann, T., Roth, A., Martinis, S., Twele, A., Gruber, A., 2008. Automatic Extraction of Water Bodies from TerraSAR-X Data, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, pp. III - 103-III - 106.
- Hebb, A., Mortsch, L., 2007. Floods: Mapping vulnerability in the Upper Thames Watershed under a Changing Climate.
- Henry, J.-B., Chastanet, P., Fellah, K., Desnos, Y.-L., 2006. Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. International Journal of Remote Sensing, 27(10): 1921-1929.
- Henry, J.B., 2004. Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur - Strasbourg I. 238 pages, 238 pp.

- Hess, L.L., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y., 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4): 896-904.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Simonett, D.S., 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7): 1313-1325.
- 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. *Natural Hazards*, 57(2): 525-548.
- Horritt, M.S., 1999. A statistical active contour model for SAR image segmentation. *Image and Vision Computing*, 17(3-4): 213-224.
- Horritt, M.S., Bates, P.D., 2001. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrol. Process.*, 15(5): 825-842.
- Horritt, M.S., Mason, D.C., Cobby, D.M., Davenport, I.J., Bates, P.D., 2003. Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 271-281.
- Hostache, R. et al., 2009. Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(2): 431-441.
- Hostache, R., Puech, C., Raclot, D., 2005. Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005* (article 381).
- IPCC, 2012. *Managing The Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Field, C.B., 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 (Eds.). Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge, ENGLAND, 582 pp.
- James, B., 2008. *La prévention des catastrophes: le rôle de l'UNESCO*. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la culture, Paris. 49 pages.
- Jousseaume, V., Mercier, D., 2009. Évaluer la vulnérabilité architecturale de l'habitat en zone inondable: L'exemple du Val nantais, *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. L'Harmattan, pp. 199-214.
- Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D., 1988. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1(4): 321-331.
- 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.
- Kienberger, S., 2007. Assessing the vulnerability to natural hazards on the provincial/community level in Mozambique: The contribution of GIScience and Remote Sensing, *Joint CIG/ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management*, Toronto, Canada.

- Kussul, N., Shelestov, A., Skakun, S., 2011. Flood Monitoring from SAR Data - Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. In: Kogan, F., Powell, A., Fedorov, O. (Eds.). NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Netherlands, pp. 19-29.
- L'Homme, J., 2006. Modélisation des inondations en milieu urbain: approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 298 pages pp.
- 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.
- Leclerc, M., Secretan, Y., Heniche, M., Ouarda, T.B.M.J., Marion, J., 2003. Une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(5): 914-922.
- 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.
- Macina, F., Bignami, C., Chini, M., Pierdicca, N., 2006. Exploiting Physical and Topographic Information within a Fuzzy Scheme to Map Flooded Area by SAR, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on, pp. 1052-1055.
- Maggi, M., Brivio, P.A., Colombo, R., Tomasoni, R., 1998. Flooded areas estimation using radar images and digital elevation model. In: Cecchi, G., Zilioli, E. (Eds.), *Earth Surface Remote Sensing II. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie)*. Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham, pp. 46-53.
- Mallinis, G., Gitas, I.Z., 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*: 1-13.
- Malnes, E., Guneriusson, T., Høgda, K.A., 2002. Mapping of flood-area by RADARSAT in Vannsjø, Norway, *Proceedings of the 29th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Buenos Aires, Argentina.
- 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., 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 Trans. Geosci. Remote Sensing*, 49(1 PART 1): 251-263.
- Mason, D.C. et al., 2001. A Sensitivity Analysis of the Waterline Method of Constructing a Digital Elevation Model for Intertidal Areas in ERS SAR scene of Eastern England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(6): 759-778.

- Mason, D.C., Davenport, I.J., Neal, J.C., Schumann, G.J.P., Bates, P.D., 2011. A near real-time algorithm for flood detection in urban and rural areas using high resolution Synthetic Aperture Radar images, Space Technology (ICST), 2011 2nd International Conference on, pp. 1-4.
- Mason, D.C., Davenport, I.J., Neal, J.C., Schumann, G.J.P., Bates, P.D., 2012a. Near Real-Time Flood Detection in Urban and Rural Areas Using High-Resolution Synthetic Aperture Radar Images. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50(8): 3041-3052.
- Mason, D.C., Horritt, M.S., Dall'Amico, J.T., Scott, T.R., Bates, P.D., 2007. Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 45(12): 3932-3943.
- Mason, D.C., Schumann, G.J.P., Neal, J.C., Garcia-Pintado, J., Bates, P.D., 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, D.C. et al., 2010. Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 48(2): 882-894.
- Matgen, P. et al., 2011. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 36(7-8): 241-252.
- Matgen, P., Schumann, G., Henry, J.B., Hoffmann, L., Pfister, L., 2007. 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.
- Messner, F., Meyer, V., 2006. FLOOD DAMAGE, VULNERABILITY AND RISK PERCEPTION – CHALLENGES FOR FLOOD DAMAGE RESEARCH - Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. In: Schanze, J., Zeman, E., Marsalek, J. (Eds.). NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences. Springer Netherlands, pp. 149-167.
- Morel, G., Hissel, F., Aunay, S., Démotier, S., 2009. OSIRIS-Multirisques : une méthode et un outil d'aide à la décision pour les communes soumises aux risques majeurs Cybergeographie : European Journal of Geography [En ligne], Article 466.
- Morin, M., 2008. Concepts de base en sécurité civile, 60 pages pp.
- Néelz, S. et al., 2006. Using remotely sensed data to support flood modelling. Water Management, 159(WMI): 35-43.
- Nicholls, R.J., Small, C., 2002. Improved estimates of coastal population and exposure to hazards released. Eos Trans. AGU, 83(28).
- 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.
- 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.

- Pageon, J., 2008. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'une MRC face aux ressources essentielles, Université de Montréal, 107 pp.
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., Glade, T., 2010. Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Natural Hazards*, 58(2): 645-680.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., Mouton, F., 2009. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4): 1149-1159.
- Pellizzeri, T.M. et al., 2003. Flood monitoring in urban areas: Statistical vs. neurofuzzy approach. 2nd Grss/Isprs Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Ieee, New York, 211-215 pp.
- Petit, F., 2009. Concepts d'Analyse de la Vulnérabilité des Infrastructures Essentielles - Prise en Compte de la Cybernétique, École Polytechnique de Montréal, 267 pages pp.
- 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. et al., 2010. A FUZZY-LOGIC-BASED APPROACH FOR FLOOD DETECTION FROM COSMO-SKYMED DATA. 2010 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Ieee, New York, 4796-4798 pp.
- Polidori, L., 1997. Cartographie Radar. Taylor & Francis.
- Poulin, J., Chokmani, K., Tanguy, M., Bernier, M., 2012. Cartographie dynamique de la vulnérabilité des populations aux inondations en milieu urbain. Rapport de recherche n°X-xxx (sous presse), INRS-ETE.
- 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., Pierdicca, N., Chini, M., 2010. Analysis of Cosmo-SkyMed observations of the 2008 flood in Myanmar. *Riv. Ital. Telerilevamento*, 42(1): 79-90.
- 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.
- Robert, B., Rousselle, J., Marche, C., 2001. Automatisation de la planification des mesures d'urgence pour les municipalité à risque. Sécurité Publique et Protection Civile Canada: 49 Pages.
- 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, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3): 234-281.
- Sanyal, J., Lu, X.X., 2004. Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: A review. *Natural Hazards*, 33(2): 283-301.

- Schmitt, A., Wessel, B., Roth, A., 2010. Curvelet-based Change Detection on SAR Images for Natural Disaster Mapping. *Photogramm. Fernerkund. Geoinf.*(6): 463-474.
- Schneiderbauer, S., Ehrlich, D., 2004. Risk, hazard and people's vulnerability to natural hazards. A Review of definitions, concepts and data. In: European Commission, J.R.C. (Ed.).
- Schumann, G., Di Baldassarre, G., Bates, P.D., 2009. The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(8): 2801-2807.
- Schumann, G. et al., 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. et al., 2007. Deriving distributed roughness values from satellite radar data for flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 344(1-2): 96-111.
- Schumann, G.J.P., Bates, P.D., Di Baldassarre, G., Mason, D.C., 2012. The Use of Radar Imagery in Riverine Flood Inundation Studies, *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 115-140.
- Schumann, G.J.P., Neal, J.C., Mason, D.C., Bates, P.D., 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. Toward an integrated flood vulnerability index - A flood vulnerability Assessment, University of Twente, Twente, 85 pages pp.
- Smith, L.C., 1997. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrol. Process.*, 11(10): 1427-1439.
- Sohn, H.G., Song, Y.S., Kim, G.H., 2005. Detecting water area during flood event from SAR image. In: Gervasi, O. et al. (Eds.). *International Conference on Computational Science and Its Applications - ICCSA 2005*, pp. 771-780.
- Solbø, S., Solheim, I., 2005. Towards operational flood mapping with satellite SAR. 2004 Envisat and ERS Symposium, Salzburg, pp. 1603-1609.
- Speck, R., Turchi, P., Süß, H., 2007. An end-to-end simulator for high-resolution spaceborne SAR systems. 65680H-65680H.
- Stabel, M.E., Löffler, E., 2004. Optimised mapping of flood extent and floodplain structures by radar EO-methods. In: Lacoste, H. (Ed.). *Proceedings of FRINGE 2003 Workshop*, Frascati, pp. 357-363.
- Stephens, E.M., Bates, P.D., Freer, J.E., Mason, D.C., 2012. The impact of uncertainty in satellite data on the assessment of flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 414-415(0): 162-173.
- Temimi, M. et al., 2011. A synergetic use of active microwave observations, optical images and topography data for improved flood mapping in the Gulf of Mexico, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International*, pp. 1544-1546.

- Townsend, P.A., 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, P.A., Walsh, S.J., 1998. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, 21(3-4): 295-312.
- UN/ISDR, 2004 *Living With Risk, A global Review of Disaster Reduction Initiatives*. UN Publications, Geneva.
- UNDP, 2004. *Reducing Disaster Risk, A Challenge for Development.*, Bureau for Crisis Prevention and Recovery.
- UNDRO, 1979. "Natural Disasters and Vulnerability Analysis": Report of Expert Group Meeting.
- Van der Sande, C.J., De Jong, S.M., De Roo, A.P.J., 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.
- Vinu Chandran, R., Ramakrishnan, D., Chowdary, V.M., Jeyaram, A., Jha, A.M., 2006. Flood mapping and analysis using air-borne synthetic aperture radar: A case study of July 2004 flood in Baghmata river basin, Bihar. *Current Science*, 90(2): 249-256.
- Voigt, S. et al., 2008. Extraction of flood masks using satellite based very high resolution SAR data for flood management and modeling, 4th International Symposium on Flood Defence, Toronto, Ontario, Canada. May 6-8 2008.
- Wdowinski, S., Kim, S.W., Amelung, F., Dixon, T., 2006. Wetland InSAR: A new space-based hydrological monitoring tool of wetlands surface water level changes. 1st International Symposium on GlobWetland: Looking at Wetlands from Space, Frascati, Rome.
- Weydahl, D.J., 1996. Flood monitoring in Norway using ERS-1 SAR images, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.', International, pp. 151-153 vol.1.
- Wilhelmi, O.V., Morss, R.E., Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event: A Fort Collins case study. *Environmental Science & Policy*(0).
- Wilhelmi, O.V., Morss, R.E., 2012. Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event: A Fort Collins case study. *Environmental Science & Policy*(0).
- Zhai, G., Fukuzono, T., Ikeda, s., 2006. An empirical model of fatalities and injuries due to floods in Japan. *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.

Sites internet

<http://www.quebecgeographique.gouv.qc.ca/approfondir/bibliotheque/geoinfo/geoinfo-juillet-2011.asp>

ANNEXES

ANNEXE 1 PRÉSENTATION DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION DISPONIBLES

RADARSAT-2

Polarisation	Date d'acquisition	Type d'acquisition	Visée	Orbite	Résolution spatiale	Angle d'incidence	Beam mode	Nom Image
HH	1 ^{er} mai, 11h14	Ultra fin	Droite	Descendante	3 m	23° (Far) 21°(Near)	U72	20110501_111414
HH	1 ^{er} mai, 11h14	Ultra fin	Droite	Descendante	3 m	23° (Far) 21°(Near)	U72	20110501_111412
HH	1 ^{er} mai, 11h14	Ultra fin	Droite	Descendante	3 m	23° (Far) 21°(Near)	U72	20110501_111409
HH	1 ^{er} mai, 11h14	Ultra fin	Droite	Descendante	3 m	23° (Far) 21°(Near)	U72	20110501_111407
HH-HV	5 mai, 10h57	Fin	Droite	Descendante	8 m	40° (Far) 43°(Near)	F3N	20110505_105727
HH-HV	5 mai, 10h57	Fin	Droite	Descendante	8 m	40° (Far) 43°(Near)	F3N	20110505_105732
HH-HV	7 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110507_225921

Polarisation	Date d'acquisition	Type d'acquisition	Visée	Orbite	Résolution spatiale	Angle d'incidence	Beam mode	Nom Image
HH-HV	7 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110507_225921 Mixed_ LUT
HH-HV	7 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110507_225926
HH-HV	7 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110507_225926 MIXED_ LUT
HH-HV	8 mai, 11h09	Standard	Droite	Descendante	25 m	24° (Far) 31°(Near)	S2	20110508_110945
HH-HV	8 mai, 11h09	Standard	Droite	Descendante	25 m	24° (Far) 31°(Near)	S2	20110508_110958
HH-HV	11 mai, 22h41	Fin	Droite	Ascendante	8 m	31° (Far) 44°(Near)	F22N	20110511_224242
HH-HV	11 mai, 22h41	Fin	Droite	Ascendante	8 m	31° (Far) 44°(Near)	F22N	20110511_224253
HH-HV	11 mai, 22h42	Fin	Droite	Ascendante	8 m	31° (Far) 44°(Near)	F22N	20110511_224247
HH-HV	12 mai, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110512_105323
HH-HV	12 mai, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110512_105317

Polarisation	Date d'acquisition	Type d'acquisition	Visée	Orbite	Résolution spatiale	Angle d'incidence	Beam mode	Nom Image
HH-HV	12 mai, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110512_105312
HH-HV	19 mai, 10h49	Fin	Droite	Descendante	8 m	47° (Far) 49°(Near)	F6F	20110519_104914
HH-HV	19 mai, 10h49	Fin	Droite	Descendante	8 m	47° (Far) 49°(Near)	F6F	20110519_104908
HH-HV	19 mai, 10h49	Fin	Droite	Descendante	8 m	47° (Far) 49°(Near)	F6F	20110519_104903
HH-HV	25 mai, 11h13	Standard	Droite	Descendante	25m	20° (Far) 27°(Near)	S1	20110525_111357
HH-HV	31 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110531_225923
HH-HV	31 mai, 22h59	Fin	Droite	Ascendante	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110531_225928
HH-HV	5 Juin, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110605_105325
HH-HV	5 Juin, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110605_105319

Polarisation	Date d'acquisition	Type d'acquisition	Visée	Orbite	Résolution spatiale	Angle d'incidence	Beam mode	Nom Image
HH-HV	5 Juin, 10h53	Fin	Droite	Descendante	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110605_105314
HH-HV	7 Juin, 22h55	Fin	Droite	Ascendant	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110607_225512
HH-HV	12 Juin, 10h49	Fin	Droite	Descendant	8 m	48° (Far) 50°(Near)	F6F	20110612_104916
HH-HV	12 Juin, 10h50	Fin	Droite	Descendant	8 m	48° (Far) 50°(Near)	F6F	20110612_104911
HH-HV	14 Juin, 22h51	Fin	Droite	Ascendant	8 m	40° (Far) 43°(Near)	F3N	20110612_255114
HH-HV	14 Juin, 22h51	Fin	Droite	Ascendant	8 m	40° (Far) 43°(Near))	F3N	20110612_255108
HH-HV	14 Juin, 22h51	Fin	Droite	Ascendant	8 m	40° (Far) 43°(Near)	F3N	20110612_255102
HH-HV	29 Juin, 10h53	Fin	Droite	Descendant	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110629_105325
HH-HV	29 Juin, 10h53	Fin	Droite	Descendant	8 m	44° (Far) 47°(Near)	F5N	20110629_105320

Polarisation	Date d'acquisition	Type d'acquisition	Visée	Orbite	Résolution spatiale	Angle d'incidence	Beam mode	Nom Image
HH-HV	6 Juillet, 10h49	Fin	Droite	Descendant	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110706_104916
HH-HV	6 Juillet, 10h49	Fin	Droite	Descendant	8 m	47° (Far) 50°(Near)	F6F	20110706_104911
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Pol	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110148
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Polarization	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110144
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Polarization	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110141
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Polarization	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110138
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Polarization	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110134
HH-VV-HV-VH	22 Mai, 11h01	Fine Quad Polarization	Droite	Descendant	8 m	36° (Far) 38°(Near)	FQ17	20110522_110133

Données optiques de très haute résolution spatiale

Capteur	Date	Bandes	Secteur
GeoEye	1er Mai 2011	RGB	Milieu Île Sainte-Thérèse-» Secteur Domaine des Saules
IKONOS	8 Mai 2011	RGB	Mosaïque (Pont Jean Lessage, autoroute 20-» Nord Lac Champlain)
IKONOS	8 Mai 2011	RGB	Mosaïque, prolongée au Sud-Est -» Hawley's Corner
IKONOS	8 Mai 2011	RGB	Section Nord (Nord du Pont Félix-Gabriel Marchand)
IKONOS	8 Mai 2011	RGB	Section Sud Est (Sud du Pont Félix-Gabriel Marchand-» Nord du lac Champlain)
IKONOS	8 Mai 2011	RGB	Section Sud-Ouest (Sud-Ouest de la zone, descend plus bas dans le Lac Champlain)
WorldView	1er Mai 2011	Panchromatique	Milieu Île Sainte-Thérèse-» Secteur Domaine des Saules
ALI	11 Mai 2011	RGB	Les Hurons -» Frontière USA
ALI	11 Mai 2011	SWIR	Les Hurons -» Frontière USA

ANNEXE 2 INFRASTRUCTURES ESSENTIELLES PAR SECTEUR ET SOUS-SECTEURS

(selon la définition nord-américaine; d'après Robert et al., 2001)

Secteurs	Sous-secteurs
Technologies de l'information et de la communication	systèmes, logiciels, matériel et réseaux de télécommunications et de radiodiffusion, y compris Internet
L'énergie et les services publics	production d'énergie électrique, de gaz naturel et de pétrole, ainsi que leurs réseaux de transport
Les aliments	sécurité, distribution, agriculture et industrie alimentaire
Les services et institutions de santé	hôpitaux, établissements de soins de santé et de réserve de sang, laboratoires et produits pharmaceutiques
Les infrastructures gouvernementales	services, installations, réseaux d'information, biens gouvernementaux et sites et monuments nationaux clés
Les industries de fabrication	base industrielle de la défense, industrie chimique
Les installations financières	opérations bancaires, valeurs mobilières et investissements
L'eau	eau potable et gestion des eaux usées
Les transports	voies aériennes, ferroviaires, maritimes et terrestres
La sécurité	premiers intervenants, services d'urgence et barrages

ANNEXE 3 QUESTIONNAIRE CRÉÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ INTRINSÈQUE

Estimation de la vulnérabilité intrinsèque

- **Cadre de l'analyse :**

Cette partie a pour objectif de quantifier la vulnérabilité intrinsèque de la population face au risque d'inondation. Cette dimension de la vulnérabilité est une caractéristique propre de la population hors situation de crise et est considérée comme un facteur aggravant la vulnérabilité des populations touchées.

- **Indicateurs de vulnérabilité intrinsèque de la population**

Les indicateurs de vulnérabilité intrinsèque considérés dans ce projet sont d'ordre social et économique. Les indicateurs relevés dans la littérature étant nombreux et variés, nous avons choisi de ne sélectionner que ceux présentant le plus de pertinence pour notre analyse, et dont les données sont facilement disponibles. Ces indicateurs seront exprimés en pourcentage de la population totale par aire de diffusion du recensement de Statistique Canada (environs 500 personnes).

Indicateurs sociologiques	Indicateurs économiques	Commentaires?
- Personnes âgées de plus de 65 ans - Personnes de moins de 18 ans - Personnes handicapées physiques ou mentales	- Personnes sans emploi - Personnes vivant sous le seuil de pauvreté	

- **Importance de chaque indicateur dans l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque**

Dans le tableau suivant, indiquer le niveau d'importance que vous accordez à chacun des indicateurs socio-économiques sélectionnés dans la gestion des situations d'urgence en cas d'inondations.

Échelle d'importance de l'indicateur						
Indicateurs	Personnes âgées	Jeunes	Handicapés	Sans emploi	Personnes pauvres	Femmes
Personnes âgées						
Jeunes						
Handicapés						
Sans emploi						
Personnes pauvres						
Femmes						

1 : Peu important; 2 : Modérément important; 3 : Fortement important 4 : Très important
5 : Extrêmement important.

Commentaires : _____

- **Vulnérabilité intrinsèque et niveaux de conséquences**

En vous basant sur les informations précédentes et sur votre expérience, indiquez, pour chaque indicateur, à partir de quel pourcentage de la population totale du quartier (aire de diffusion) change de niveau de vulnérabilité est atteint

Exemple : Lorsque le pourcentage de personnes handicapées au sein d'un quartier est entre 25 et 30%, le niveau vulnérabilité face aux inondations est « Sévère ».

Les cases vides vous permettent d'introduire, si besoin est, d'autres éléments à cette partie de l'analyse.

% de la population	Niveaux de vulnérabilité			
	Mineure	Sérieux	Sévère	Très Sévère
Personnes âgées				
Jeunes				
Handicapés				
Sans emploi				
Personnes pauvres				
Femmes				

Commentaires : _____