



## La résilience : concilier la cartographie des risques d'inondation et la réglementation des usages

L'usage règle la carte ou la carte règle l'usage?  
D'abord quantifier le risque et le monétiser  
Une critériologie axée sur le « risque acceptable » requise  
Une cartographie axée sur des critères d'usage résilient  
Le contrôle et le suivi de l'adaptation aux risques  
Les analyses coûts/avantages (les ACA)  
La dangerosité et les urgences – le mode opérationnel  
Exemples de cartes au lac des Deux-Montagnes  
La sensibilisation et la diffusion  
La gouvernance : implanter ce paradigme avec les OBV  
Exemples de cartes du risque de dommage direct  
**Pour une ACA générique du risque**

*Par : Michel Leclerc, ing., D.ing.,*

*Hydrologue-cadre, MRC Vaudreuil-Soulanges dans le cadre d'une entente tripartite avec les MRC d'Argenteuil et Deux-Montagnes*

*Membre du Comité scientifique consultatif de la Ville de Gatineau pour la cartographie des zones inondables*

*Professeur associé-honoraire de l'INRS Centre Eau, Terre & Environnement*

*Et Président de l'Organisme de bassins versants Charlevoix-montmorency*

Pours fins de citation : Leclerc, Michel (2021). *[La résilience: concilier la cartographie des risques d'inondation et la réglementation des usages.](#)* Document 1428. INRS, Centre Eau Terre & Environnement, Québec. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/11194/>

Version du fichier : [Concilier cartographie des risques et réglementation - Avril 2021 V2.2.docx](#)

Date : 13 avril 2021

### Résumé

Ce document de réflexion se veut une contribution méthodologique de l'auteur au débat en cours sur l'implantation de l'approche risque appliquée aux aléas d'inondation. Il se veut également une contribution non sollicitée à l'élaboration d'un nouveau cadre normatif pour la gestion des risques. L'auteur tient à préciser que les exemples fournis et les idées émises sont au stade d'hypothèses de travail et qu'elles ne représentent pas nécessairement des approches définitives. Le document porte sur la conciliation de divers instruments de gouvernance des risques axés sur l'adaptation aux aléas d'inondations et sur la recherche d'une plus grande résilience des communautés riveraines. Ces deux démarches instrumentales, intimement et forcément liées, sont :

- **La cartographie des aléas d'inondation, de leur dangerosité et des risques de dommages directs reliés**
- **La réglementation des usages vulnérables et la critériologie applicable à la résilience.**

L'approche considérée ici comporterait **TROIS TYPES DE CARTES** selon l'usage qu'on veut en faire, exclusivement en régie ou adressée au public, applicables à court ou à long terme, ou en continu.

- **LA FONCTION SENSIBILISATION. Les cartes fréquentielles**, assez sommaires, très agrégées, uniques mais évolutives selon les CC (mises à jour aux 10 ans selon la loi 67 récemment votée à l'AN), seraient axées sur la récurrence des crues seulement, mais dans toute la gamme des possibilités. Elles seraient publiables sur internet pour le grand public, avec interprétation de la fréquence et la dangerosité plutôt que désignées par la période de retour. Ces cartes serviraient principalement à la **sensibilisation des riverains** au phénomène des crues (transparence) dans le territoire d'intérêt. Leur usage est donc *continu et permanent*. Cette approche est similaire à l'approche actuelle de cartographie des zones inondables (zones de faibles et de grands courants de la PPRLPI) à la différence fondamentale **qu'elle serait débranchée de la réglementation directe des usages** comme dans la PPRLPI. Plusieurs récurrences peuvent alors être montrées et les zones délimitées seraient désignées qualitativement par des termes adéquats à la communication grand public.
- **LA FONCTION GESTION DES URGENCES. Des cartes événementielles de dangerosité pour les personnes**. Elles seraient *statiques et/ou dynamiques, en temps réel et/ou différé (mode prévisionnel comme dans Info-Crue)*, mais à usage en régie seulement (MRC, municipalités). Elles porteraient sur la **submersion événementielle** du terrain (et les courants en modélisation 2D; selon la directive du MELCC et les ententes avec le MAMH). Elles serviraient *en phase différée préparatoire* à la planification des mesures d'urgence et/ou *en temps réel ou prévisionnel* à leur déploiement préventif ou opérationnel. Elles porteraient aussi une information pertinente à la sécurité des personnes (critères de dangerosité proposés dans les lignes directrices du MELCC (2021) et entérinées par le MSP.
- **LA FONCTION AMÉNAGEMENT RÉSILIENT DU TERRITOIRE. Cartes de risques réglementés liées aux usages autorisés ou aux droits acquis**. Celles-ci sont les plus élaborées et elles sont réservées à un usage exclusivement en régie (MRC, Municipalités) et par les consultants et promoteurs pour la conception de projets; elles serviraient, via une réglementation appropriée allant de pair, à doser **le risque acceptable** pour l'aménagement résilient des zones inondables et éviter la mise en place de vulnérabilités. Ce sont les cartes les plus élaborées et elles devront porter la réglementation à venir, du moins pour le secteur résidentiel. **La notion de risque acceptable est fondamentale** pour la confection de ces cartes. Elle peut donner lieu à des ACA locales ou à une **ACA générique** (notre recommandation).

Cette dernière forme, la principale composante de « **l'Approche Risques** », est beaucoup plus riche en contenu d'information que les deux premières. Elle pourrait être similaire à la [méthode CRUE](#) (originellement proposée en 2006 et adaptée en 2021) de l'INRS axée sur la vulnérabilité du secteur résidentiel, ou porter plus simplement sur des hauteurs critiques qui caractérisent le début des dommages directs. **L'usage résidentiel est ciblé en priorité** ici car il est souvent le plus important et le plus recherché en milieu riverain, il est lourd de conséquences et il est également associé à la dangerosité pour les personnes. Les dommages humains, financiers et sociaux reliés à la submersion de résidences sont aussi les plus lourds à porter pour les ménages (patrimoine), les Municipalités et l'État quand l'exposition à la submersion dépasse les seuils critiques acceptables. De surcroît, leur portée est souvent systémique à l'échelle du quartier et elle comporte des conséquences fiscales considérables pour les Municipalités.

**Cette approche est-elle faisable et applicable, et par quelle instance...?**

Cette question soulève celle de l'état actuel des connaissances, de la disponibilité des données de base requises et de notre mode de gouvernance des risques. Notre avis est généralement positif, scientifiquement et techniquement à la portée Ministères impliqués, voire des services d'aménagement et d'urbanisme du milieu municipal, voire même des OBV des bassins versants pour l'aléa. Une adaptation du paradigme de gouvernance est toutefois requis (cadre normatif) qui devrait mettre en lumière la mission fondamentale des principaux organismes gouvernementaux impliqués. Cette évolution pourrait nécessiter une ACA générique.

Les deux premiers types de cartes, de types *fréquentiel* ou *événementiel*, sont parfaitement réalisables à court terme partout où un modèle hydraulique valide est appliqué et qu'un MNT précis existe. Certaines MRC le font déjà (MRC Vaudreuil-Soulanges, d'Argenteuil). En phase de **préparation aux crues**, la planification des mesures d'urgence utilise les simulations hydrauliques pour anticiper (simuler la submersion et le danger relié pour les opérations) les conséquences possibles dans toute la gamme des crues. **En situation d'urgence**, un mode opérationnel est mis en place pour la cartographie événementielle qui devient alors dynamique pour anticiper et accompagner la crue. Une collaboration étroite avec le programme Info-Crue devient alors primordiale (sa mission principale). Les outils prévisionnels de la crue (Info-Crue, Vigilance Inondations) sont en effet fortement indiqués pour anticiper l'aléa et, sauf exceptions, hors de portée des compétences courantes du monde municipal. Pour les régions ou MRC où les facilités géomatiques ne sont pas présentes, le Programme Info-Crue du MELCC peut aisément apporter son support pour le volet dangerosité.

Le reste du temps (en permanence), la **sensibilisation aux risques** peut se faire avec une carte unique axée sur la fréquence des aléas, dans **toute la gamme des crues**. Il faut prévoir un format signifiant pour la carte (éviter de désigner les crues par un nombre d'années ou une période de retour contre-intuitive) ainsi **qu'un plan de communication** web qui assure une diffusion efficace et accessible de l'information.

Il est à noter que cette carte fréquentielle produirait (contient) l'information requise pour appliquer la réglementation actuelle car le sous-ensemble des zones de récurrence 2, 20 et 100 ans de la PPRLPI y seraient représentées (mais sous des noms différents que ceux de **grands et faibles courants**). Cette possibilité permettrait d'éviter à court terme un **vide réglementaire** en appliquant en phase intérimaire la réglementation actuelle, soit le délai requis pour que le lien fonctionnel entre la nouvelle réglementation et les cartes de risques soit bien établi (cartes de risque acceptable), c'est-à-dire, sur l'horizon 2020 idéalement.

Les **cartes de risque acceptable pour le secteur résidentiel** sont les plus riches des trois types proposés dans la mesure où elles seraient bâties en fonction de paramètres d'implantation dans le terrain des bâtiments jugés conformes à un niveau acceptable de dommages directs encourus. Une **norme ou critère de taux d'endommagement potentiel acceptable** est alors à spécifier comme base de la réglementation. Évidemment, le nombre de couches de données à traiter dépendra du nombre de modes d'implantation à considérer (ex : secteur desservi par les services d'eau ou pas, classes de résidences avec ou sans sous-sol aménagé, sur pilotis, sur vide sanitaire, RC plus ou moins surélevé, degré d'immunisation); le nombre de cartes peut vite se multiplier, mais il existe des approches d'agrégation permettant d'en réduire le nombre. Il est toutefois compris que cette information est numérique et accessible au sein d'une base de données géoréférencée (géomatique). Par contre, ces calculs peuvent être effectués une fois pour toutes et rendu immédiatement accessibles dans un SIG pour la régie interne des permis. Le calcul peut aussi s'effectuer ponctuellement à partir des données locales (ex : sur Excel ou un utilitaire informatique spécialisé).

Pour la faisabilité, notons aussi que la sensibilité aux dommages du secteur résidentiel québécois aux inondations commence à être beaucoup mieux connue avec des relations empiriques quantitatives validées entre les types d'implantation et les dommages directs moyens annuels pouvant résulter d'épisodes de

submersion récurrents (re : Travaux de la CMI sur le Richelieu). Ces courbes, celles livrées à la CMI par Doyon et Jean (2021; en phase de validation) sont construites à partir de données d'indemnisation post-sinistre (N=1630 résidences) et reflètent donc la part du risque assumée collectivement via l'État (indemnisations). Pour une image plus complète des conséquences du risque, une prise en compte de la part assumée par les riverains peut être ajoutée (environ 20%).

**Une recommandation est émise concernant le besoin d'une ACA générique qui permettrait d'évaluer l'efficacité ou le risque encouru par diverses mesures inscrites dans la réglementation résidentielle des zones inondables en préparation (cadre normatif). Une approche économétrique intégrée prenant en compte les principes de précaution et de développement durable, l'incertitude climatique ainsi que l'équité des charges assumées, devrait rechercher une critériologie du risque acceptable.**

Le présent document est complété par quelques exemples illustrant la forme de cartes de risques de dangerosité et du dommage direct au secteur résidentiel telles que réalisées par les MRC Vaudreuil-Soulanges et d'Argenteuil sous les instructions de l'auteur de ce document et de collaborateurs du MSP.

*Mots-clés : Risques, inondations, cartographie, gouvernance, réglementation, Archipel de Montréal, lac des Deux-Montagnes, dangerosité, dommages, équité, urgences, sensibilisation, intervention, secteur résidentiel, critériologie du risque, développement durable, incertitude climatique, OBV et Plans directeurs de l'eau*

## Matières

**La résilience : concilier la cartographie des risques d'inondation et la réglementation des usages** L'usage règle la carte ou la carte règle l'usage? D'abord quantifier le risque et le monétiser Une critériologie axée sur le « risque acceptable » requise Une cartographie axée sur des critères d'usage résilient Le contrôle et le suivi de l'adaptation aux risques Les analyses coûts/avantages (les ACA) La dangerosité et les urgences – le mode opérationnel Exemples de cartes au lac des Deux-Montagnes La sensibilisation et la diffusion La gouvernance : implanter ce paradigme avec les OBV Exemples de cartes du risque de dommage direct

<b>Pour une ACA générique du risque</b> .....	1
Résumé.....	1
Pour l'aménagement résilient du territoire : les cartes de risque.....	8
Les perspectives de l'approche risque (secteur résidentiel): le bilan économétrique et les analyses coûts/avantages (ACA).....	9
Le modèle empirique de base .....	10
L'algorithme.....	10
La critériologie .....	11
La réglementation afférente.....	11
Pour la sensibilisation aux inondations : la carte fréquentielle.....	11
Son rôle et sa portée .....	11
La réalisation de cartes de risques d'endommagement .....	11
Illustration .....	12
Pour les interventions d'urgence, des cartes événementielles de dangerosité.....	13
Ses rôles.....	13
La critériologie de dangerosité .....	14
Exemples de cartes de dangerosité .....	16
La fonction planification des mesures d'urgence : réalisation .....	20
La fonction intervention .....	20
La gouvernance des risques .....	20
Le contexte municipal .....	20
Les organismes de bassin versant (OBV) et les Plans directeurs de l'eau (PDE).....	20
Annexe 1 : Courbes empiriques de submersion/dommages .....	22
Introduction sur les relations empiriques proposées .....	22
Résidences à un étage non desservies selon le type .....	24
Résidences à deux étages non desservies selon le type .....	24
Résidences à un étage desservies selon le type .....	25
Résidences à deux étages desservies selon le type .....	25
Annexe 2: modèle de risque (l'approche CRUE).....	26

La méthode CRUE pour les dommages directs au secteur résidentiel .....	26
Cartographie du risque ou taux d'endommagement moyen annuel : exemple pour la baie Carillon ....	27
Présentation des exemples .....	28
Construction des cartes dans Arc-GIS .....	28
Résultats .....	29
Recommandation : vers une ACA générique du risque de dommages directs .....	29
Possibilités offertes par l'approche CRUE .....	35
Autres perspectives de la cartographie – Les urgences .....	35

## Illustrations

Figure 1 : Processus d'analyse coûts/avantages (ACA) applicable en atténuation-adaptation aux risques. 9	
Figure 2 : Carte de zones inondables selon l'approche actuelle – vs – la proposition du Comité d'Action interministériel sur la gestion des risques d'inondation (Source : communiqué du MAMH, avril 2020)... 13	
Figure 3 : Exemple de carte de dangerosité (Méthode élaborée) – Indice FHR – Secteur du Domaine de la baie Carillon – L'événement représente la crue de mai 2017..... 17	
Figure 4 : Exemple de carte de dangerosité (Méthode élaborée) – Indice de submersion – Secteur du Domaine de la baie Carillon – L'événement représente la crue de mai 2017 ..... 18	
Figure 5 : Exemple de carte de dangerosité (Méthode élaborée) – Indice de vitesse Secteur Robillard de la Rivière-du-Nord (embouchure) – L'événement représente la crue de mai 2017 ..... 19	
Figure 6 : Définition des variables de submersion d'un bâtiment en fonction des cotes de crue ..... 23	
Figure 7 : Courbe de submersion- endommagement pour les résidences non desservies à un étage selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020) ..... 24	
Figure 8 : Courbe de submersion-endommagement pour les résidences non desservies à deux étages selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020) ..... 24	
Figure 9 : Courbe de submersion- endommagement pour les résidences desservies à un étage selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)..... 25	
Figure 10 : Courbe de submersion-endommagement pour les résidences desservies à deux étages selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)..... 25	
Figure 11 : Interprétation graphique du risque RMA: l'aire sous la courbe..... 27	
Figure 12 : Secteur riverain visé par les cartes du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre – Baie Carillon (Long-Sault)..... 30	
Figure 13 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) sans sous-sol – Baie Carillon (Long-Sault) – Modèle fréquentiel du CEHQ (2006) ou de Favre et coll. (2010)..... 31	
Figure 14 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) avec sous-sol aménagé – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel du CEHQ (2006) ou de Favre et coll. (2010) ..... 32	

Figure 15 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) avec sous-sol aménagé – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel de l'INRS (Ouarda et Charron, 2010) ..... 33

Figure 16 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) sans sous-sol – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel de l'INRS (Ouarda et Charron, 2010) ..... 34

## Tableaux

Tableau 1 : Critères de dangerosité proposés pour la submersion du terrain dans les lignes directrices du MAMH (MELCC, 2018) ..... 14

Tableau 2 : Limites de classes de dangerosité selon l'indice composite proposé par le MSP ..... 15

Tableau 3 : Valeur de l'indice composite de dangerosité selon la valeur des paramètres hydrodynamiques du modèle ..... 16

Tableau 4 : Classes de DMA% utilisées pour la cartographie – Les classes sont directement mise en correspondance avec le MNT – Le secteur du lac des Deux-Montagnes correspond à la section # 10 du modèle du CEHQ – Les RC sont placés à 50 cm du MNT – La classification est intérimaire ..... 28

## Pour l'aménagement résilient du territoire : les cartes de risque

Ci-après nous abordons en priorité les prémisses dont devrait prendre en compte la *cartographie du risque*, son *acceptabilité* et la *réglementation des usages*. L'approche présentée sous-tend un important changement de paradigme dans la gouvernance des risques. Considérons ces prémisses.

### La question principale : la fonction règle la carte et/ou la carte règle la fonction? Les deux, c'est lié

1. **La cartographie spécialisée des zones inondables axée sur le risque et la réglementation des usages visant la résilience doivent aller de pair, en parfaite cohérence.** La minimisation du risque via une paramétrisation adéquate des usages vise à garder le risque à un minimum acceptable, voire pratiquement nul (puisque le risque nul n'existe pas). La paramétrisation est réalisée par règlement.
2. Qui dit minimiser, dit pouvoir quantifier, et ultimement monétiser économiquement (*Money talks*). Le risque doit pouvoir se calculer en dollars. C'est là que l'expertise acquise avec la CMI ou l'INRS (dossier Châteauguay avec le MSP - dossier Richelieu – courbes submersion/dommages récentes; dossier Saint-André d'Argenteuil) entre en jeu, car elle permet directement de mesurer (monétiser) le risque de dommages résidentiels en fonction **du mode d'implantation dans le terrain, de sa sensibilité aux dommages et de son exposition à la submersion**. Un tableur Excel récent le fait déjà pour le dossier Saint-André d'Argenteuil, à Rigaud et Pointe-Fortune et des cartes du taux d'endommagement commencent à circuler. Le coût des dommages cumulatifs peut même être réalisé avec une approche économétrique actualisée (ex : 50 ans). C'est inspiré de l'approche nord-américaine normée axée sur l'économie des risques et leur assurabilité : *les flood risk insurance maps*, la *FEMA (Federal Emergency Management Agency)*. Dans le contexte nord-américain, il semble indiqué d'orienter nos efforts dans cette direction (variante Québec).
3. **Ce qui manque encore du côté cartographique des dommages directs: une critériologie du risque acceptable et quantifiable.** Il faut idéalement statuer (normer; cadre normatif) sur un critère économétrique, idéalement générique (uniforme), de type « **risque acceptable** » chiffrable et normé
  - a. Par exemple: 0,1%/an de taux d'endommagement moyen annuel au bâtiment ou l'item vulnérable,
  - b. ou encore, le taux d'endommagement cumulatif actualisé sur la durée de vie utile d'un immeuble, par exemple 50 ans avec actualisation à 4%/an (l'exemple de Saint-André d'Argenteuil)

Cette critériologie permettra de délimiter (autoriser ou interdire) la distribution sécuritaire d'un usage sur la carte et d'en régler (règlementation) les paramètres d'implantation pour qu'il demeure résilient à long terme, c'est-à-dire durable: dommages cumulatifs minimisés, non-exposition à la submersion, immunisation, normes architecturales adaptées, implantation dans le terrain conforme aux infrastructures de drainage pluvial et sanitaire.

4. C'est donc la **limite critique d'acceptabilité d'un usage donné** qui serait ainsi portée sur une carte des ZI axée sur la gestion du risque. Il est donc implicitement nécessaire de répliquer ces limites pour chaque classe d'usage, une tâche de production géomatique importante mais faisable. Elle serait de plus axée sur l'aménagement du territoire plutôt qu'exclusivement sur la récurrence des crues comme maintenant (voir plus loin le format recyclé des cartes fréquentielles). Ce sont des résultats à intégrer directement dans les bases de données ARC-GIS de nos MRC.

*Les perspectives de l'approche risque (secteur résidentiel): le bilan économétrique et les analyses coûts/avantages (ACA)*

Si l'approche risque pour le secteur résidentiel est compatible avec la cartographie comme nous le verrons plus loin, là ne s'arrête pas l'intérêt de l'approche, au contraire. En permettant de quantifier rigoureusement le risque dans un territoire donné, il est possible d'en évaluer l'ampleur et de mettre en place des mesures d'atténuation ou d'adaptation dont on peut mesurer l'efficacité et l'opportunité tant économique que financière, incluant l'équité intersectorielle.

Un suivi rigoureux du bilan actuel et de mesures d'**adaptation aux risques et aux CC**, dans un contexte climatique incertain et dans une trame urbaine sous la pression du développement, est de plus en plus indiqué après les crues exceptionnelles des dernières années. Cette approche de type économétrique (les ACA sont de type *costs/benefits*) permet aussi d'effectuer un suivi continu du **risque événementiel annuel** encouru par secteur riverain (avec une approche agrégée par secteur homogène ou voisinage) et d'intégrer dans le calcul du **risque moyen annuel** une dérive fréquentielle avérée liée aux CC. Plusieurs autres possibilités d'analyse et de suivi comme celle-là se présentent *a priori* pour la gestion du risque, notamment par la connexion directe du calcul de risque sur les attributs du rôle d'évaluation. Les exemples d'analyse de risques à Châteauguay en 2008 et à Saint-André d'Argenteuil en 2021 en témoignent.

La mise en œuvre de l'approche risques ouvre donc grande la porte à la conduite d'**analyses coûts/avantages ou ACA** (Figure suivante) pour des mesures d'adaptation : avec cette approche, il est bien sûr possible de procéder rapidement à un bilan des risques dans les conditions actuelles d'occupation du territoire (rôle d'évaluation). C'est le chapitre un de toute ACA visant des projets majeurs d'adaptation aux CC. Le Consortium Ouranos préconise ces approches (Programme Résalliance d'Ouranos). L'ACA consiste à évaluer l'impact favorable d'une mesure d'adaptation quelconque sur le bilan des risques et les dommages évités.

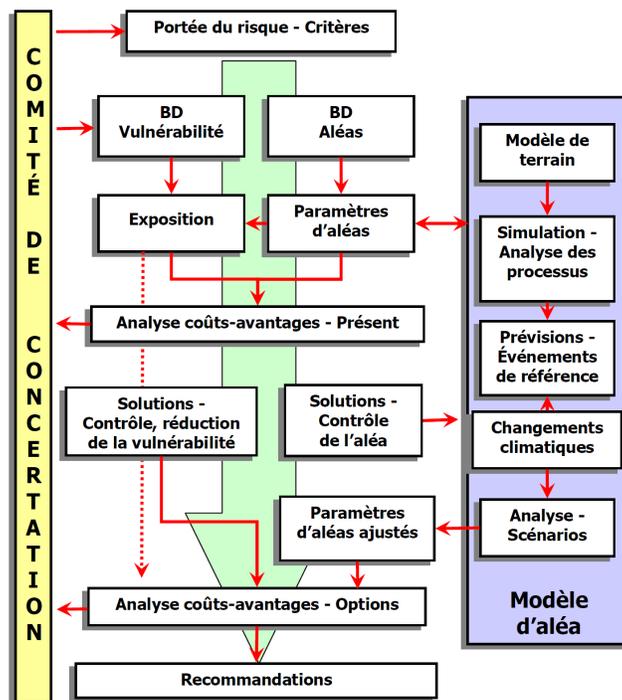


Figure 1 : Processus d'analyse coûts/avantages (ACA) applicable en atténuation-adaptation aux risques

### *Le modèle empirique de base*

Quelques travaux de base ont été réalisés à l'INRS en lien avec la sensibilité de l'habitat québécois aux dommages directs d'inondations et la cartographie des risques. [Blin \(2001\)](#) et [Blin et coll. \(2005\)](#), dans un premier temps. Ces travaux employaient un jeu de courbes empiriques liant le dommage aux résidences à la submersion comme variable explicative. Ces courbes ont été élaborées par l'équipe de la Chaire industrielle en hydrologie statistique de l'INRS (Ouarda, T, dans : Leclerc et coll., 1997)<sup>1</sup> suite à la crue catastrophique du Saguenay en 1996.

Par la suite, les autorités d'Environnement Canada ont jugé utile d'enrichir l'échantillon de données d'indemnisation avec d'autres crues importantes survenues ailleurs au Québec (ex : Sorel). Cette initiative a donné lieu aux travaux de [Bonnifait \(2005\)](#), après [Bonnifait et Leclerc \(2004\)](#). Les courbes qui en ont résulté ont servi à ce jour aux quelques analyses de risque réalisées par la suite, notamment dans le cadre de la CMI pour la mise au point du nouveau plan de gestion des débits et niveaux d'eau du système Saint-Laurent – Grands-Lacs ([plan 2014](#)). Plus récemment, Jean et Doyon (2020) et Doyon et Leclerc (2020)<sup>2</sup> procèdent (en cours) à une mise à jour majeure de ces courbes à partir d'un échantillon de plus de 1600 résidences indemnisées de différents types de la rivière Richelieu. Ces courbes seront bientôt publiées et rendues disponibles à la Communauté québécoise. Nous en produisons une version préliminaire en annexe 1.

Il est à signaler que le format de ces courbes a été choisi en vue d'être entièrement compatibles avec l'approche américaine des analyses de risques (*cost/benefit analysis; risk analysis*), question de cohérence transfrontalière dans le cadre de la Commission mixte (CMI). Comme elles représentent la part directement indemnisée des dommages (via les assurances ou l'État), l'obtention d'une image complète des dommages directs devrait aussi tenir compte de la part des dommages (**équité**) assumée par les riverains, voire même par les Municipalités. Le résultat obtenu avec ces courbes indique donc si le dommage subi est acceptable du point de vue de l'État sans égard à la part assumée par le sinistré ou les autorités locales. Un facteur de majoration paraît donc indiqué pour obtenir un tableau plus complet de l'équité des coûts des dommages parmi les intervenants.

Cette approche de l'équité qui est de nature financière (qui paye, qui en bénéficie?) se distingue de la méthode économique qui cherche à établir l'avantage global pour la société (Desjarlais, C., Consortium Ouranos, Comm. pers., 2019).

### *L'algorithme*

Le passage de courbes de submersion/dommages à la cartographie du risque dans un territoire donné mobilise plusieurs jeux de données explicatives, notamment :

1. Le comportement hydraulique du cours d'eau en crue (l'espace-solution des crues probables, la submersion, sa durée),
2. La fréquence des aléas (analyse fréquentielle)
3. Le modèle de terrain local (le MNT ex : LiDAR de précision).

---

<sup>1</sup>Leclerc M., J. Marion, M. Heniche, T. Ouarda et Y. Secretan (1997). Prédiction des dommages résidentiels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi, aux Sables et du lac Kénogami. Rapport scientifique INRS-Eau #R511. 108 p.

<sup>2</sup> Inédit, en révision ou révision)

4. Le type et le mode d'implantation des bâtiments dans le terrain qui fournit les paramètres permettant d'exprimer la sensibilité des bâtiments aux dommages directs.

Une chaîne de calculs bien connus en cartographie des zones inondables (lignes directrices 2012) doit donc être mobilisée. Heureusement, en 2021, la plupart de ces jeux de données sont immédiatement disponibles via des SIG et mis à jour récemment (le programme du MAMH de cartographie des zones inondables), du moins pour la plupart des régions urbaines vulnérables aux inondations et déjà cartographiées.

La combinaison de ces jeux de données procède par un algorithme de post-traitement mis au point par [Blin \(2001\)](#) et appliqué en primeur sur la rivière Montmorency à Québec ([Blin et coll., 2005](#)). La forme algébrique de l'algorithme est fournie à l'annexe 2. La paramétrisation des dommages directs sera bientôt disponible.

#### *La critériologie*

Dans un souci d'équité, l'acceptabilité du risque ne devrait pas varier d'un usager à l'autre pour un type d'usage donné. S'il était possible de s'assurer que les dommages subis sont équitablement répartis en proportion du potentiel de vulnérabilité, tout en cherchant à les minimiser, le résultat serait plus intéressant. C'est ce que le calcul du risque unitaire (méthode CRUE) permet de vérifier car ce n'est pas tout de pouvoir cartographier le risque unitaire d'endommagement.

#### *La réglementation afférente*

Cette section reste à élaborer en détails. On peut déjà mentionner que l'intervention de l'expertise en architecture et en ingénierie des bâtiments et des infrastructures de drainage est requise pour statuer sur les dommages possibles résultant de nouvelles normes de construction résiliente ou suite à des travaux d'immunisation.

### **Pour la sensibilisation aux inondations : la carte fréquentielle**

#### *Son rôle et sa portée*

La carte fréquentielle serait unique à un secteur riverain donné. Elle cherche à représenter sur une seule image l'ensemble des possibilités de crues probables dans un secteur en vue de sensibiliser les riverains aux risques de submersion encourus au fil du temps, à court comme à long terme.

Cette carte est similaire aux cartes de zones inondables classiques dans la mesure où elle est axée uniquement sur la fréquence des aléas, à la différence qu'elle englobe un large éventail de possibilités (probabilités) plutôt qu'exclusivement les zones de faibles courants (100 ans) ou de grands courants (20 ans). On peut ainsi en représenter toute la gamme, des crues annuelles jusqu'aux événements les plus exceptionnels. L'autre différence majeure est liée au fait qu'à terme, elle ne servira plus à la réglementation directe lorsque l'approche risque sera couplée à une nouvelle proposition réglementaire. La fréquence peut être qualifiée avec un vocabulaire signifiant (usuel) plutôt qu'être désignée par une période de retour (années). Les longues périodes de retour ont plutôt tendance à rassurer plutôt qu'inquiéter. Par exemple, la zone 100 ans est associée à une perception de cinq générations humaines; sa désignation de « faibles courants » est trompeuse car cette crue peut être associée à des flux de débris importants.

#### *La réalisation de cartes de risques d'endommagement*

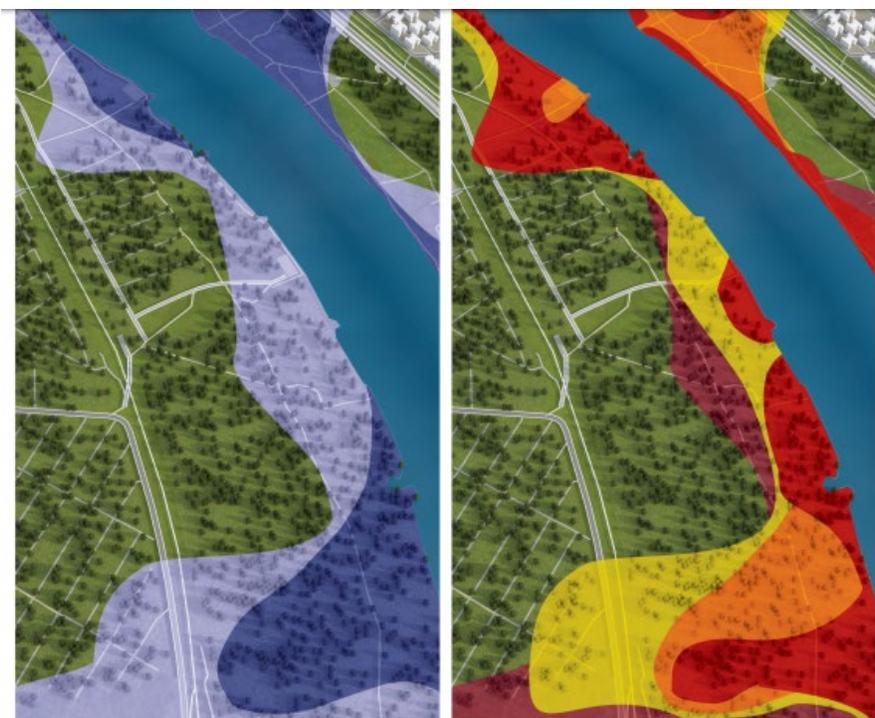
L'approche se résume comme suit :

1. *Cartographier la fréquence des crues* (cotes de crue portées dans le terrain) avec une échelle de couleur ou de ton monochrome basée sur une classification fréquentielle étendue (et non la submersion événementielle)
2. *Ce format de carte est similaire aux cartes de ZI existantes* mais toutes les fréquences significatives sont montrées plutôt que les zones actuelles de faibles et de grands courants
3. Cette carte traduit l'information fréquentielle en langage de communication et une symbologie adaptée à la sensibilisation (nombre de classes de couleur à préciser), par exemple :
  - a. *Très fréquent* (ex : annuel),
  - b. *Régulièrement* (2 ans),
  - c. *Occasionnellement* (10 ans),
  - d. *Probablement mais peu fréquent* (20 ans),
  - e. *Rarement mais possible* (50 ans),
  - f. *Exceptionnellement* (100 ans),
  - g. *Crue historique* (max observé; les plus hautes eaux connues) ou *crue de récurrence* 350 ans.
4. Avec ce format de carte, les zones fréquentielles sont colorées monochrome (bleu) du plus foncé (récurrence moyenne annuel) au plus pâle (exceptionnel ou historique).
5. Ce genre de carte renseigne sur la probabilité effective que la submersion atteigne un point donné du territoire. La valeur de la submersion n'est pas représentée.
6. *Aucune réglementation* n'est directement associée à cette carte; il n'y en a qu'une seule par secteur comme maintenant. Elle ne sert cependant qu'à sensibiliser les riverains à la fréquence des aléas possibles dans un secteur donné et elle est publique sur le net.
7. Si la *structure fréquentielle montre une dérive liée aux CC ou via un plan de gestion* des niveaux d'eau, cette carte peut aisément être mise à jour avec les ajustements requis et remise en ligne. Elle n'a pas d'impact direct sur la réglementation. Seules les fréquences interviennent indirectement dans l'approche risque mentionnée précédemment.

#### *Illustration*

Un exemple effectif de ce genre de cartes est à l'étude actuellement à la MRC Vaudreuil-Soulanges pour l'ensemble du lac des Deux-Montagnes. La MRCVS dispose de 16 événements de crue simulés (simulateur H2D2) avec une approche incrémentale axée sur le niveau à Sainte-Anne-de-Bellevue lequel est augmenté graduellement par pas de 10 cm entre les cotes 23,5 m et 25 m. Cette gamme de crues appelée « espace-solution en crue » peut aisément être exploitée en mode fréquentiel d'après les travaux de l'INRS (Ouarda et Charron, 2020) lesquels prennent en compte une hypothèse de principe de précaution pour l'Outaouais.

En attendant ces résultats cartographiques, nous reprenons ici la suggestion issue des travaux du *Groupe d'action interministériel sur la gestion des risques*. Nous croyons que ce genre de carte, similaire aux cartes existantes des zones inondables devrait éventuellement être découplée de la réglementation afférente relative aux zones de grands et de faibles courants.



EXEMPLE FICTIF D'UNE CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

RÉGIME ACTUEL AXÉ SUR LA RÉCURRENCE	RÉGIME PROPOSÉ AXÉ SUR LA GESTION DES RISQUES
<b>Légende</b>	<b>Légende</b>
— Zone de récurrence de 0 - 20 ans	— Niveau de danger de LULÉA D'INONDATION
— Zone de récurrence de 20 - 100 ans	— Négligeable
	— Faible
	— Modéré
	— Élevé

Québec

Figure 2 : Carte de zones inondables selon l'approche actuelle – vs – la proposition du Comité d'Action interministériel sur la gestion des risques d'inondation (Source : communiqué du MAMH, avril 2020)

## Pour les interventions d'urgence, des cartes événementielles de dangerosité

### Ses rôles

Dans le contexte d'intervention, des **cartes de submersion et de courants événementielles**, statiques ou dynamiques, en temps réel ou prévisionnelles, sont très utiles, voire indispensables pour un usage à court terme lors des urgences. Par exemple, on peut ainsi déterminer les secteurs résidentiels susceptibles d'être enclavés par la crue anticipée et décider de les évacuer au moment propice.

Ces cartes opérationnelles peuvent simplement classifier la submersion ou les courants. Classifiées selon la **dangerosité pour les personnes ou les véhicules** en période d'intervention, elles sont certainement plus utiles. Leur confection s'avère assez simple dans un SIG lorsqu'on dispose d'un modèle hydraulique valide et d'un modèle de terrain précis. La fréquence des crues n'est pas très pertinente dans un contexte d'intervention. C'est en effet très pertinent pour les interventions visant la sécurité des personnes et c'est utile immédiatement *en urgence ou mieux pour s'y préparer*. C'est entre autres ce que la Directive du MAMH nous demande minimalement de livrer à l'égard de la dangerosité locale des crues. (Tableau qui suit) :

*Tableau 1 : Critères de dangerosité proposés pour la submersion du terrain dans les lignes directrices du MAMH (MELCC, 2018)*

- 0,3 m : la stabilité d'une voiture légère est compromise (EMA, 1999);
- 0,5 m : la stabilité d'un enfant est compromise (Cox et al. 2010);
- 0,6 m : la stabilité d'une camionnette et d'une ambulance (0,65 m) est compromise (Mens et al. 2008);
- 0,8 m : la stabilité d'un adulte est compromise et l'aléa est de catégorie modérée (DECCW, 2005);
- 1 m : la stabilité d'un camion de pompier est compromise et l'aléa est de catégorie élevée (DECCW, 2005);
- 1,2 m : la stabilité d'un secouriste équipé est compromise (Cox et al. 2010).

Des critères similaires sont proposés pour les courants (sans qu'ils soient qualifiés pour la dangerosité):

- > 2 m/s
- 1 – 2 m/s
- 0.5 – 1 m/s
- 0.2 – 0.5 m/s
- 0 – 0.2 m/s

Ci-après nous traitons successivement la planification et l'intervention en période d'urgence.

*La critériologie de dangerosité*

Les dernières lignes directrices (mars 2021) du MELCC et nos travaux de cartographie en lien avec un projet de relocalisation de résidences vulnérables à Saint-André d'Argenteuil ou STADA (Comm. MSP, 2021) ont permis de tester divers indices de dangerosité monovariés (submersion, vitesses) et un autre qui est une forme composite tenant compte de la submersion, de la vitesse de courant et d'un facteur débris lié à la submersion (voir plus loin). De plus, à STADA, le MSP a souhaité que ces indices soient cartographiés à deux échelles : celle des secteurs résidentiels concernés et celle individuelle de certaines habitations ciblées. Enfin, la cartographie s'est limitée à représenter trois événements de crue, soit les quantiles 10 ans, 20 ans et les plus hautes eaux connues (crue de 2017). Notre avis est que ces cartes doivent plutôt couvrir l'espace solution avec une approche incrémentale.

L'indicateur composite de dangerosité est tiré de la section 13.7.2 de :

*Defra / Environment Agency - Flood and Coastal Defence R&D Programme - Flood Risk Assessment Guidance for New Development - Phase 2. Framework and Guidance for Assessing and Managing Flood Risk for New Development – Full Documentation and Tools. R&D Technical Report FD2320/TR2. October 2005*

Avec la Table 4 de :

*SUPPLEMENTARY NOTE ON FLOOD HAZARD RATINGS AND THRESHOLDS FOR DEVELOPMENT PLANNING AND CONTROL PURPOSE – Clarification of the Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321/TR1. Suresh Surendran and Geoff Gibbs (Environment Agency), Steven Wade and Helen Udale-Clarke (HR Wallingford)*

L'indice *FHR* prend la forme suivante :

$$FHR \text{ (Flood Hazard Rating)} = ((|V| + 0,5) \times H) + DF$$

Où,

*FHR* Indice composite de dangerosité pour les personnes ou **Indice de dangerosité**

*|V|* Le module de la vitesse de courant [m/s]

*H* La hauteur de submersion ou profondeur locale [m]

*DF* *Debris flow* ou un indicateur de débris

L'indicateur de débris *DF* est lui-même une fonction de la submersion avec la classification suivante applicable en milieu urbain (proposition initiale amendée par le MSP, 2021). La proposition initiale (DEFRA) utilise un critère de profondeur (0,25 m) pour la profondeur:

$$\text{Pour } 0,0 \text{ m} < H < 0,25 \text{ m}; \quad DF = 0,5$$

$$\text{Pour } 0,3 \text{ m} < H; \quad DF = 1,0$$

La classification selon le niveau de danger s'opère avec les limites de classes suivantes :

*Tableau 2 : Limites de classes de dangerosité selon l'indice composite proposé par le MSP*

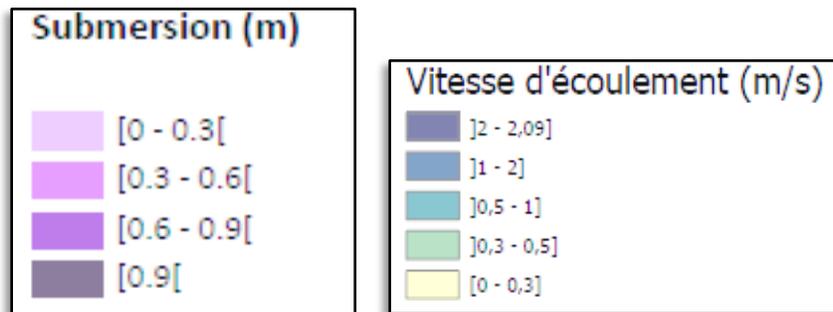
<i>DF</i>		Couleur de classe	Interprétation de la dangerosité
Min	Max		
2,0			Danger pour tous incluant les services d'urgence
1,25	2,0		Danger pour plusieurs incluant la population en général
0,75	1,25		Danger pour les personnes vulnérables incluant les personnes âgées et à mobilité réduite
0,0	0,75		Danger faible
		Aucune	Aucun danger

Quand on introduit une analyse de sensibilité aux variables hydrodynamiques observables, l'indice composite *FHR* se comporte comme dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Valeur de l'indice composite de dangerosité selon la valeur des paramètres hydrodynamiques du modèle

		Indicateur de débris DF													
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1
		Submersion (m)													
Vitesse (m/s)		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.40	0.55	0.70	0.85	1.00	1.50	2.00	2.50
0		0.5	0.53	0.55	0.58	0.6	0.63	1.2	1.28	1.35	1.43	1.5	1.75	2	2.25
0.25		0.5	0.54	0.58	0.61	0.65	0.69	1.3	1.41	1.53	1.64	1.75	2.13	2.5	2.88
0.5		0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	1.4	1.55	1.7	1.85	2	2.5	3	3.5
0.75		0.5	0.56	0.63	0.69	0.75	0.81	1.5	1.69	1.88	2.06	2.25	2.88	3.5	4.13
1		0.5	0.58	0.65	0.73	0.8	0.88	1.6	1.83	2.05	2.28	2.5	3.25	4	4.75
1.5		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.8	2.1	2.4	2.7	3	4	5	6
2		0.5	0.63	0.75	0.88	1	1.13	2	2.38	2.75	3.13	3.5	4.75	6	7.25
2.5		0.5	0.65	0.8	0.95	1.1	1.25	2.2	2.65	3.1	3.55	4	5.5	7	8.5
3		0.5	0.68	0.85	1.03	1.2	1.38	2.4	2.93	3.45	3.98	4.5	6.25	8	9.75
3.5		0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	2.6	3.2	3.8	4.4	5	7	9	11
4		0.5	0.73	0.95	1.18	1.4	1.63	2.8	3.48	4.15	4.83	5.5	7.75	10	12.3
4.5		0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	3	3.75	4.5	5.25	6	8.5	11	13.5
5		0.5	0.78	1.05	1.33	1.6	1.88	3.2	4.03	4.85	5.68	6.5	9.25	12	14.8

Le MSP a aussi choisi de tester des classes de dangerosité monovariées (submersion, vitesse) un peu différentes de celles proposées dans les lignes directrices du MELCC (2021). Pour la submersion et les vitesses, les classes sont comme suit :



Mise en garde : Étant donné que la plupart du temps, les modèles hydrodynamiques ne prend pas en compte les obstacles à l'écoulement comme les bâtiments et que la discrétisation du modèle (taille des mailles) est souvent grossière par rapport à celle disponible pour le relief (MNT LiDAR), toute indication obtenue à partir de cette variable doit être interprétée avec toute l'attention et la prudence nécessaires.

*Exemples de cartes de dangerosité*

Quatre secteurs riverains de STADA et d'autres aussi à Rigaud et Pointe-Fortune ont ainsi été cartographiés pour la dangerosité. Nous en présentons ici des exemples dans la baie Carillon et de l'embouchure de la Rivière-du-Nord correspondant aux plus hautes eaux connues soit la crue de 2017. De plus, d'autres cartes similaires ont été produites pour huit fiches de confidentielles des résidences qui ont fait l'objet de l'étude de STADA. Pour cette raison, ces cartes ne sont pas montrées ici.

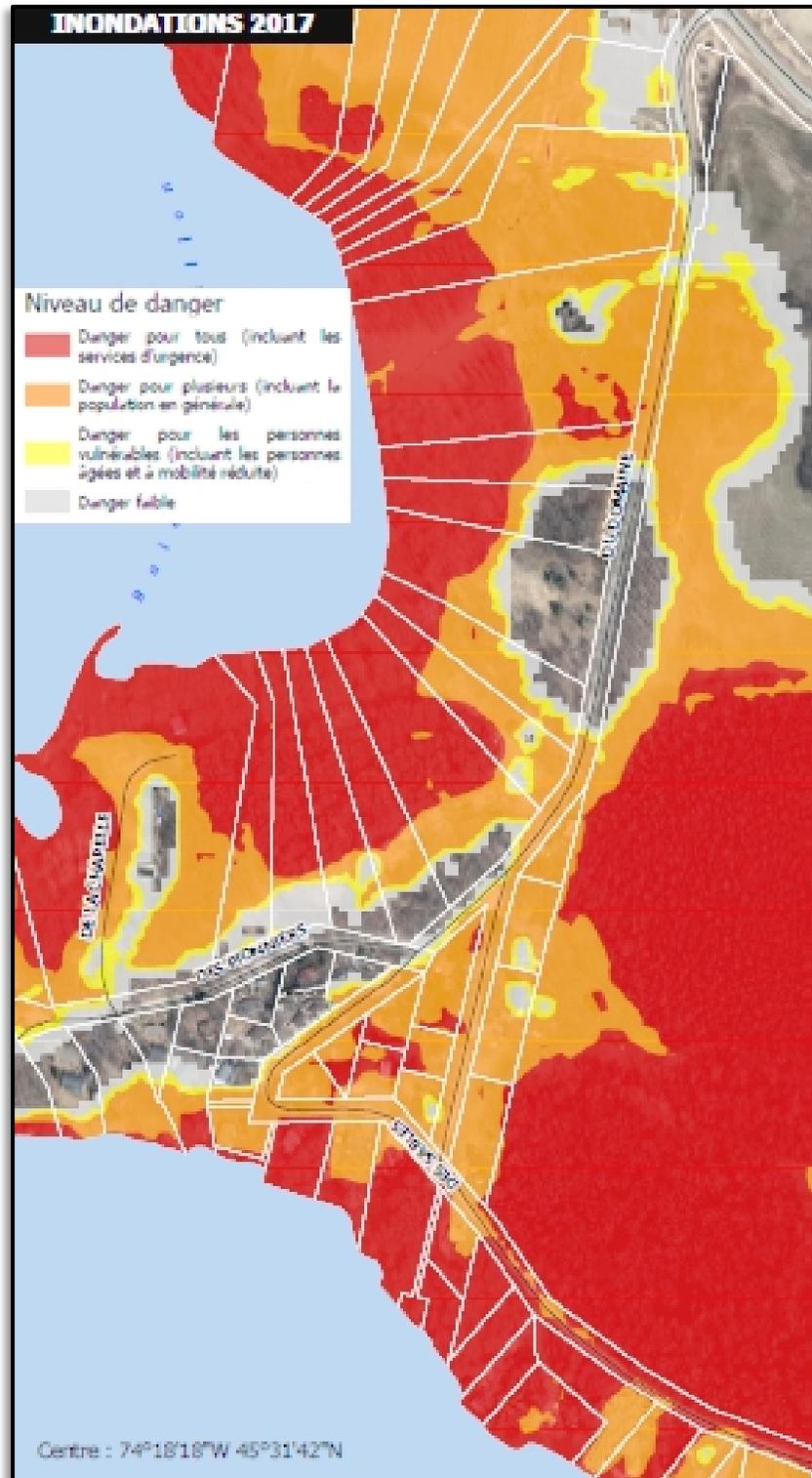


Figure 3 : Exemple de carte de dangerosité (Méthode élaborée) – Indice FHR – Secteur du Domaine de la baie Carillon – L'événement représente la crue de mai 2017





Figure 5 : Exemple de carte de dangerosité (Méthode élaborée) – Indice de vitesse Secteur Robillard de la Rivière-du-Nord (embouchure) – L'événement représente la crue de mai 2017

### *La fonction planification des mesures d'urgence : réalisation*

1. Produire l'ensemble des jeux de données de base, notamment la *submersion et la vitesse des courants* à l'aide du modèle hydraulique
2. L'échantillon d'événements de crue retenus doit être représentatif de l'ensemble de la gamme des crues probables (espace-solution). Par exemple, l'intervalle de submersion entre deux crues de référence pourrait être typiquement de  $\pm 5$  cm. Les événements intermédiaires non compris dans la liste disponible dans la base de données peuvent aisément être interpolés dans un SIG
3. Les couches de données de submersion et de courants sont interprétées avec des critères appropriés pour juger de leur dangerosité (critériologie proposée dans la Directive ministérielle p/r à la submersion et aux courants). Les possibilités d'accès aux sites et d'évacuation sécuritaire des résidents sont sans doute les principaux critères à implanter.
4. Des **cartes événementielles de dangerosité** sont ainsi tracées événement par événement sur la base des critères retenus (les MRC Vaudreuil-Soulanges et d'Argenteuil le font déjà). Ces cartes sont produites sous le format papier ainsi que sous format web via un SIG. **Note : elles sont à usage exclusif des services autorisés municipaux et ne sont pas accessible au grand public.**
5. Un processus d'*analyse systématique (contexte de simulation d'intervention)* des possibilités de crue est lancé afin d'en tirer un plan d'intervention dit **incrémental** ajusté à l'amplitude anticipée; cette *opération dite de préparation* est menée en étroite collaboration avec les services de sécurité civile des municipalités locales qui en ont la responsabilité statutaire.
6. Le plan de préparation et d'intervention prévoit idéalement tous les cas de figures représentatifs des crues et il est immédiatement disponible aux cellules de crise lors d'interventions.

### *La fonction intervention*

Le contexte d'utilisation est la phase qui précède de peu la survenue d'une crue ou de sa pointe ainsi que la phase d'intervention pendant la crue. Assortie d'un plan détaillé des mesures à prendre pour sécuriser les personnes et accessoirement les biens essentiels, la carte applicable est donc contextuelle et évolutive. Une représentation dynamique ou adaptative des résultats est donc requise pour guider les intervenants municipaux en temps réel dans l'action. En pratique, la disponibilité de *prévisions hydrologiques* à court terme facilite grandement le déploiement des mesures adéquates en renseignant à l'avance sur les priorités d'intervention. Plus l'horizon de la prévision s'allonge dans le temps (typiquement comptée en jours), plus la réponse sera adaptée.

## **La gouvernance des risques**

### *Le contexte municipal*

Les sections précédentes portaient surtout sur l'instrumentation requise pour gérer efficacement les inondations à l'aide de la meilleure information disponible. Les processus en cause, **sensibilisation, planification des urgences, aménagement résilient du territoire, réglementation** sont tous associés à des processus de gouvernance impliquant nécessairement les *plans métropolitains d'aménagement et de développement (PMAD des CM)*, les *schémas d'aménagement (les SAD des MRC)* et les *plans d'urbanisme (PU des Municipalités)*.

### *Les organismes de bassin versant (OBV) et les Plans directeurs de l'eau (PDE)*

De plus, faut-il ajouter les Plans directeurs de l'eau (PDE) des Organismes de bassin versants (OBV), le seul organisme supra-municipal (mais multisectoriel) qui a le bassin versant comme territoire de juridiction?

Un arrimage fort des OBV et des instances municipales semble requis partout où l'expertise municipale peut faire défaut, notamment en régions, ou encore, quand l'expertise municipale est présente mais dont la portée spatiale ne couvre pas intégralement le bassin versant.

Une réflexion approfondie est encore requise pour évaluer comment le changement de paradigme proposé ici s'harmonise avec les pouvoirs alloués à ces instances. Nous croyons que l'approche proposée est techniquement faisable à l'échelle municipale avec les instruments de base proposés : modèle hydrauliques, modèles de terrain précis, bases de données géographiques (SIG), Web, connaissances empiriques formelles de la sensibilité des bâtiments aux dommages, critériologie de dangerosité connue, Rôles d'évaluation enrichis d'attributs d'exposition aux aléas, etc. Par contre, le territoire des bassins versants recoupe souvent plusieurs MRC qui toutes devraient, sans les OBV répliquer des travaux de base relatifs aux aléas. Cette redondance des travaux à réaliser concernant l'aléa des crues risque de conduire à des incohérences d'amont en aval dans un même bassin versant.

Il nous semble donc indiqué d'appliquer un principe d'analyse systémique consistant à découper un problème dans ses lignes de subdivision naturelles, c'est-à-dire, dans le cas présent : les aléas aux OBV, l'aménagement du territoire, la planification et la gestion des urgences aux municipalités. La sensibilisation aux risques pourrait être partagée, les OBV ayant déjà développé une grande expertise à ce niveau notamment pour la gestion des eaux pluviales. Des mécanismes d'interaction efficaces entre ces diverses entités doivent être prévus. La **table de concertation** visant la sécurité à laquelle les municipalités ont déjà un rôle statutaire à jouer représente une instance naturelle pour mettre en œuvre cette collaboration organique.

Faut-il ajouter que ce genre de collaboration existe déjà pour d'autres enjeux liés à l'eau comme la protection des sources d'eau potable, la conservation des milieux humides ou la mise en valeur des milieux côtiers ou maritimes (accessibilité aux berges pour le plus grand nombre).

Cette stratégie ne va pas sans une nouvelle entreprise d'habilitation (*empowerment*) du personnel des OBV qui impliquerait le recrutement et/ou la formation des professionnels aux disciplines reliées (hydrologie, hydraulique, statistiques).

## Annexe 1 : Courbes empiriques de submersion/dommages

### Introduction sur les relations empiriques proposées

Les données empiriques requises pour établir le lien entre la submersion d'un bâtiment et les dommages directs ont été puisées dans la base de données du Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP; N = 1630) relative à la crue catastrophique de 2011 sur le Richelieu et au lac Champlain (Jean et Doyon, 2020). Les données de dommages sont estimées d'après les **indemnisations** allouées alors par le MSP avec quelques ajustements (soustractions) pour isoler les dommages aux bâtiments, d'autres composantes comme ceux aux puits et fosses septiques. Les indemnisations ont toutefois été majorées pour tenir compte de dommages non admissibles reliés à certains biens meubles. Les indemnisations couvrent en moyenne 80% des coûts totaux des dommages au bâtiment et aux biens meubles, la balance étant assumée par les propriétaires.

Pour cette raison, l'approche des courbes submersion-dommages doit être considérée comme un bon indicateur des dommages événementiels sans toutefois les considérer exhaustivement. Cette question a son importance pour les analyses reliées comme la cartographie des risques et les analyses coûts/avantages de mesures d'adaptation aux changements climatiques. Signalons que les normes applicables en matière d'analyse de dommages (dites règles de l'art) sont conformes aux approches nord-américaines en la matière, lesquelles doivent tenir compte de critères actuariels requis pour le régime d'assurance prévalant aux USA (*Federal Emergency Management Agency* ou *FEMA*) et l'homogénéité des approches applicables par la Commission mixte internationale (CMI) pour la gestion des eaux limitrophes. Six catégories de résidences sont considérées.

1. Résidences à un étage sans sous-sol (ou avec vide sanitaire)
2. Résidences à un étage avec sous-sol non aménagé
3. Résidences à un étage avec sous-sol aménagé
4. Résidences à deux étages sans sous-sol
5. Résidences à deux étages avec sous-sol non aménagé
6. Résidences à deux étages avec sous-sol aménagé

Le modèle empirique pour chaque cas calcule le taux d'endommagement en fonction de la submersion locale mesurée en référence au niveau du plancher du rez-de-chaussée.

La Figure 6 illustre les variables du calcul de submersion applicables au modèle empirique proposé.

La Figure 7 montre les courbes préliminaires applicables aux résidences à un étage non desservies tandis que la Figure 8 fait de même pour les résidences à deux étages.

La Figure 9 montre les courbes applicables aux résidences à un étage desservies tandis que la Figure 10 fait de même pour les résidences à deux étages.

R.C. : rez-de-chaussée

S.S. : sous-sol

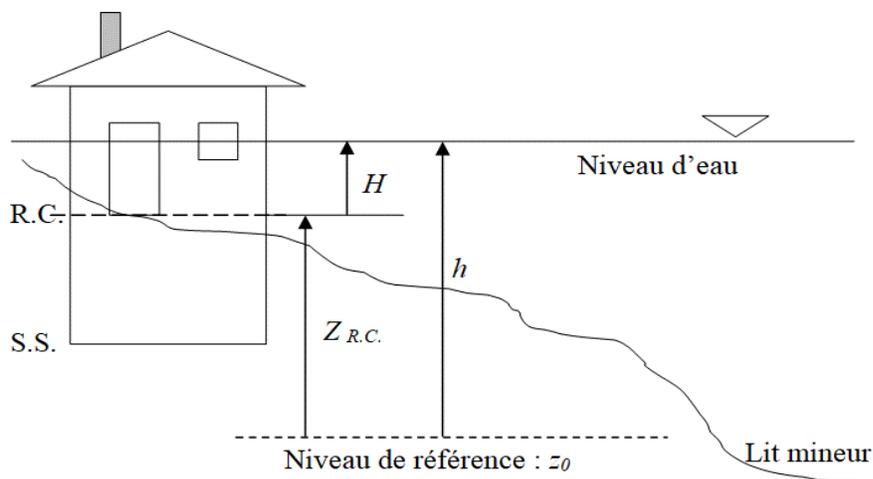
$H$  : hauteur de submersion

$h$  : cote de l'inondation

$Z_{R.C.}$  : cote du rez-de-chaussée

$$H = h - Z_{R.C.} \text{ (formule unique)}$$

Cas où  $h > Z_{R.C.}$  :  $H > 0$



Cas où  $h < Z_{R.C.}$  :  $H < 0$

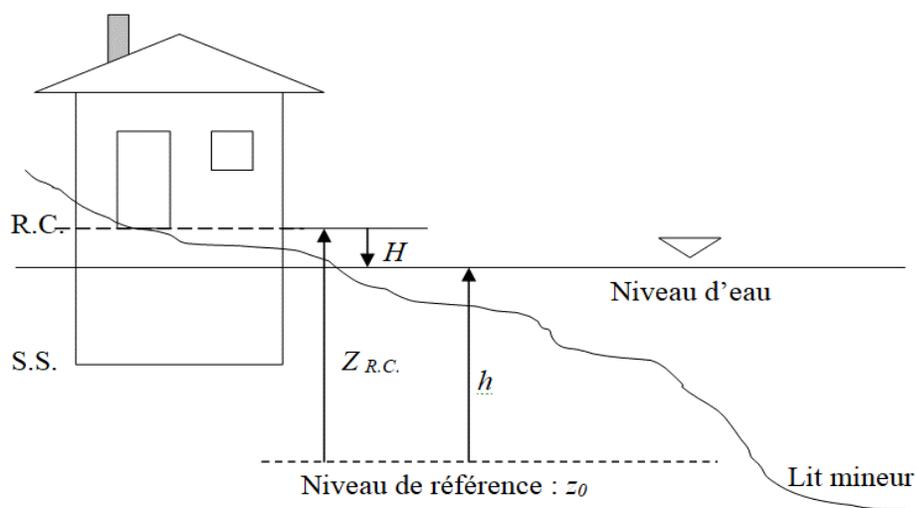


Figure 8 : Définition de la hauteur de submersion (Bonnifait, 2005)

Figure 6 : Définition des variables de submersion d'un bâtiment en fonction des cotes de crue

### Résidences à un étage non desservies selon le type

La figure suivante montre les courbes applicables aux résidences non desservies à un étage selon le type. Le tableau qui la suit fournit les relations algébriques correspondantes.

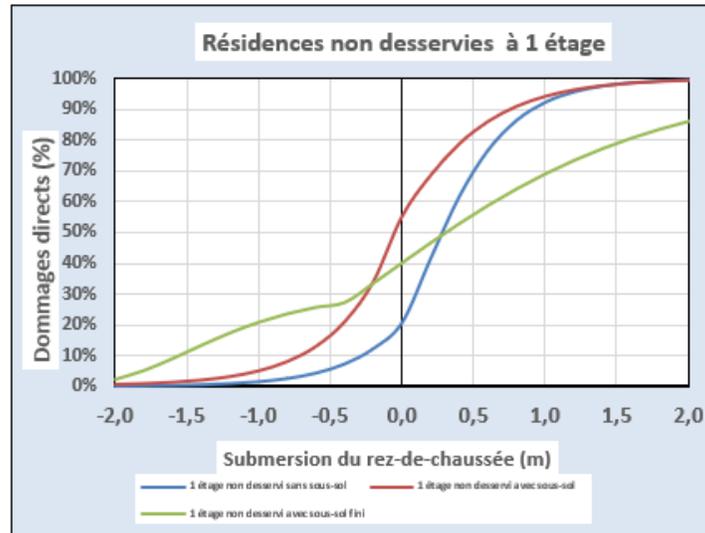


Figure 7 : Courbe de submersion-endommagement pour les résidences non desservies à un étage selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)<sup>3</sup>

### Résidences à deux étages non desservies selon le type

Les mêmes remarques relatives à la construction et à l'exploitation des courbes pour les résidences à un étage s'appliquent. Les résultats sont donnés à la Figure 8

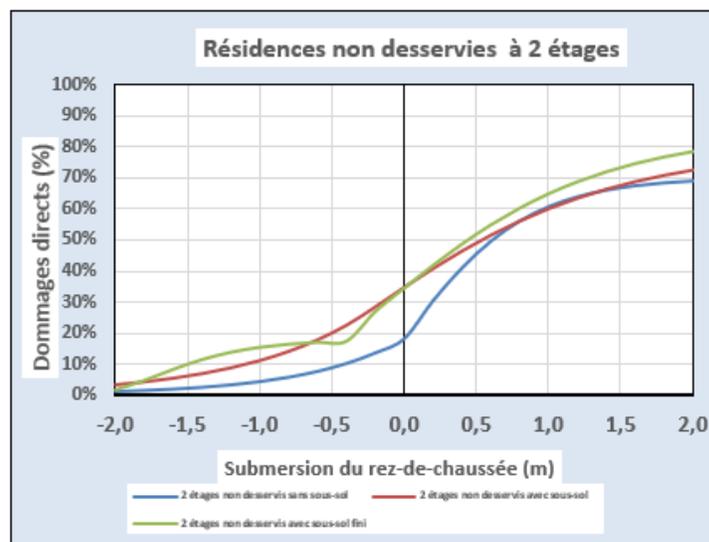


Figure 8 : Courbe de submersion-endommagement pour les résidences non desservies à deux étages selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)

<sup>3</sup> Jean, M. & B. Doyon (2020). Stage Damage Functions - Lake Champlain & Richelieu River IJC Study. Preliminary report Version finale des courbes. Octobre.

### Résidences à un étage desservies selon le type

La figure suivante montre les courbes applicables aux résidences desservies à un étage selon le type. Le tableau qui la suit fournit les relations algébriques correspondantes.

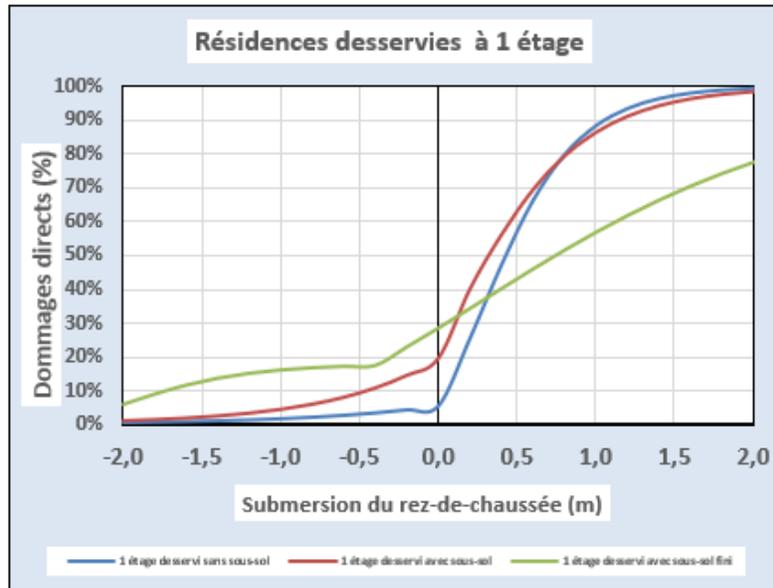


Figure 9 : Courbe de submersion- endommagement pour les résidences desservies à un étage selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)

### Résidences à deux étages desservies selon le type

Les mêmes remarques relatives à la construction et à l'exploitation des courbes pour les résidences à un étage s'appliquent. Les résultats sont donnés à la figure suivante.

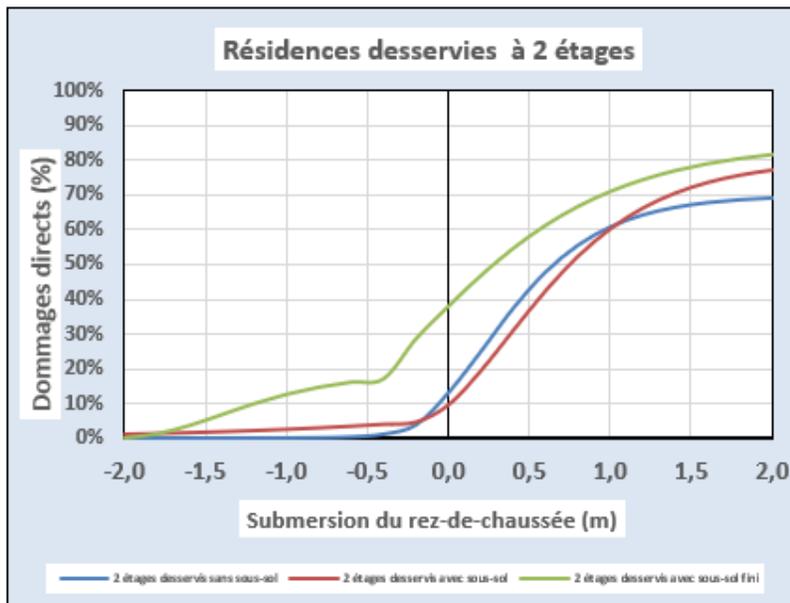


Figure 10 : Courbe de submersion- endommagement pour les résidences desservies à deux étages selon le type (D'après Jean et Doyon, 2020)

## Annexe 2: modèle de risque (l'approche CRUE)

Ce passage (l'annexe) est extrait textuellement d'un rapport (Leclerc et coll. 2021)<sup>4</sup> soumis à la Municipalité de Saint-André- d'Argenteuil

### La méthode CRUE pour les dommages directs au secteur résidentiel

Si les termes choisis et l'expression mathématique peuvent varier d'un auteur à l'autre, la définition généralement acceptée du *risque* comporte deux principales composantes, l'*aléa* qui représente l'événement problématique, dans ses aspects physiques, hydrologiques et statistiques, et la *vulnérabilité* (Gilard, et Gendreau, 1998) de la plaine inondable qui représente les dommages potentiels de différents types résultant des aléas, en l'occurrence les inondations (DEHA, 2018), et qui dépend du degré d'exposition à la submersion. Si la définition physique du risque fait à peu près consensus, celle de la vulnérabilité présente beaucoup plus de nuances quant à ce qui doit ou peut y être inclus (Grigg et Helweg, 1975), Conséquemment, il y a différentes façons de traiter de la relation entre les deux aspects du risque. La définition adoptée ici est traduite mathématiquement par l'expression suivante qui peut prendre une forme analytique continue ou préférentiellement discrète pour implantation numérique (Canadian Standards Association, 1991) :

$$RMA = \int D(P)xdP \cong \sum D(P_i)\Delta P^i \quad [1]$$

Où,

*RMA* : risque moyen annuel de dommages, exprimé en unités monétaires absolues

*D(P)* ou *D(P<sub>i</sub>)* : valeur des dommages (économiques ou autres) ou des interventions reliées

*P* ou *P<sub>i</sub>* : probabilité au dépassement (annuelle) des aléas

*i* : indice de l'intervalle de probabilité annuelle à une classe d'aléa

*dP* ou *ΔP<sub>i</sub>* : densité de probabilité annuelle pour l'événement *i*

On peut illustrer cette équation par la Figure 11. Graphiquement, le risque *RMA* correspond à l'aire sous la courbe. Cette notion de risque ne tient pas compte d'autres facteurs comme la *résilience* (capacité de rétablissement) ou la *préparation* aux sinistres qui sont des éléments contribuant à réduire les dommages.

---

<sup>4</sup> Leclerc M., B. Doyon, T.B.M.J. Ouarda, P. Boudreau, S. Morin, M.-A. Hurtubise et J.-P. Baril-Boyer (2021). Indications du dommage d'inondation direct moyen annuel et de dangerosité pour un sous-groupe de résidences vulnérables de Saint-André d'Argenteuil – Pour la Municipalité de Saint-André d'Argenteuil, la MRC d'Argenteuil et le Ministère de la Sécurité publique. Documents scientifiques et techniques INRS #427. Avril. 77 pp.+ 3 annexes (#2 et #3 confidentielles)

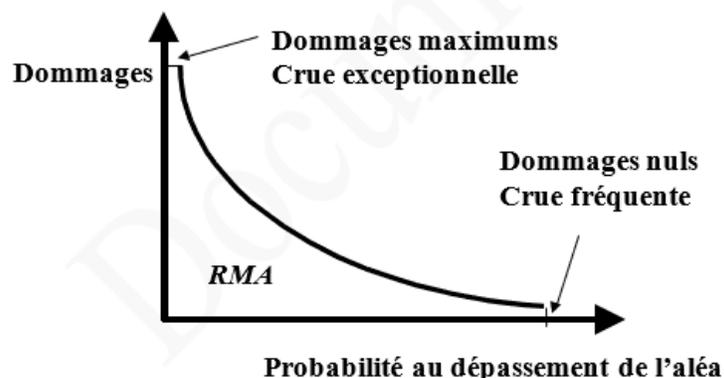


Figure 11 : Interprétation graphique du risque RMA: l'aire sous la courbe

La méthode CRUE dans sa forme actuelle n'adresse que les dommages directs au secteur résidentiel (bâtiment principal à fonction résidentielle permanente). Généralement, les dommages estimés correspondent aux coûts nécessaires à la réparation ou au remplacement des biens endommagés ou perdus, ils ne reflètent pas la valeur de la détérioration mais celle de la remise en état et donc le véritable coût engendré par la crue. Les dommages au mobilier et à l'immobilier font souvent l'objet d'évaluations distinctes, les processus d'indemnisation nécessitent une évaluation des dommages afin de fixer les montants alloués.

Lorsque des fonctions empiriques d'estimation sont utilisées, les dommages à l'habitat résidentiel sont, soit exprimés directement par le *coût absolu* des dommages (monétisé), ou bien par un *taux d'endommagement* (le coût des dommages rapporté à la valeur du bâtiment). Les fonctions sont donc, soit des *fonctions de dommages*, ou bien des *fonctions de taux d'endommagement* qui sont adimensionnelles.

Selon Torterotot (1993), l'utilisation d'un *taux d'endommagement* donne de meilleurs résultats que l'estimation du coût des dommages en raison d'une meilleure corrélation avec la hauteur de submersion. De plus, ce coefficient a l'avantage d'être plus stable dans le temps (exemple, par rapport à l'inflation) et d'être plus facilement applicable, notamment en cartographie du risque. Le taux d'endommagement varie entre 0 (aucun dommage) et 1 (100% de dommages, perte totale).

### Cartographie du risque ou taux d'endommagement moyen annuel : exemple pour la baie Carillon

Il est à noter que la méthode CRUE permet la cartographie formelle du risque en posant certaines hypothèses quant au type d'occupation (type de résidence) et à l'exposition à la submersion du bâtiment dans un terrain donné (MNT) et un scénario de fréquence de crue applicable dans la zone cartographiée. L'expérience avait été tentée dans une analyse de risque menée dès 2006 à Châteauguay (Leclerc et coll., 2006). La plupart des jeux de données requis à l'époque, modèles hydrauliques 2D, MNT de précision, géomatique, faisaient partie de l'innovation de pointe, voire de la recherche appliquée, de sorte que l'approche ne s'est pas démocratisée dans l'usage québécois (cadre normatif).

En 2020, les jeux de données et la connaissance empirique des risques encourus par le secteur résidentiel en zones inondables sont devenus beaucoup plus répandus, voire la norme (voir les lignes directrices du MELCC pour la cartographie des zones inondables émises en 2018 et confirmées en 2021), de sorte qu'on pourrait envisager d'appliquer plus largement la méthode illustrée ci-après.

## Présentation des exemples

Le but de cette section n'est pas de procéder à une analyse détaillée de la distribution du risque d'inondation dans la baie Carillon. Nous souhaitons simplement faire ressortir les possibilités offertes par l'approche CRUE. À cette fin, quatre exemples ont été implantés dans le secteur sud-est de la baie Carillon à Saint-André d'Argenteuil. Comme ce n'est pas un secteur desservi par les infrastructures d'eau de la municipalité, seuls les modèles de ce type (Jean et Doyon, 2020) sont applicables.

Pour contraster la vulnérabilité/résilience de différents types de bâtiments, nous avons retenu :

1. La résidence à un étage (bungalow) sans sous-sol (RC à 50 cm du MNT local)
2. La résidence à un étage avec sous-sol aménagé (RC à 50 cm du MNT local)

Pour contraster l'impact des crues de 2017 et 2019 sur l'augmentation du risque, nous avons appliqué à ces résidences deux modèles fréquentiels distincts :

1. Le modèle fréquentiel couramment appliqué au lac des Deux-Montagnes avant les crues de 2017 et 2019, soit celui du CEHQ (2006) et/ou celui de Favre et coll. (2010)
2. Le modèle fréquentiel de l'INRS (Ouarda et Charron, 2020) qui inclut la chronique récente des crues et incorpore une prise en compte (hypothétique) du **principe de précaution**

## Construction des cartes dans Arc-GIS

Le but communicationnel d'une carte de risque est de présenter par des couleurs significatives le niveau moyen annuel d'endommagement qui peut être encouru localement selon le mode d'implantation. À cette fin, nous avons retenu des classes distinctes de celles utilisées dans ce rapport pour assigner les couleurs aux légendes. La variable DMA% est ainsi catégorisée selon les classes suivantes.

*Tableau 4 : Classes de DMA% utilisées pour la cartographie – Les classes sont directement mise en correspondance avec le MNT – Le secteur du lac des Deux-Montagnes correspond à la section # 10 du modèle du CEHQ – Les RC sont placés à 50 cm du MNT – La classification est intérimaire*

Classes			Critères I	Critères II	Critères III	Critères IV
Code de risque	Code couleur	DMA%	Résidence avec sous-sol aménagé (INRS, 2020)	Résidence avec sous-sol aménagé (CEHQ, 2006)	Résidence sans sous-sol (INRS, 2020)	Résidence sans sous-sol (CEHQ, 2006)
Risque majeur		> 3%	23,0 - 25,59	23,0 - 24,99	23,0 - 24,59	23,0 - 23,79
Risque très élevé		2% - 3%	25,60 - 25,79	25,00 - 25,09	24,59 - 24,79	23,79 - 24,09
Risque élevé		1% - 2%	25,80 - 25,99	25,10 - 25,29	24,79 - 24,99	24,09 - 24,19
Risque moyen		0,5% - 1%	26,0 - 26,19	25,30 - 25,49	24,99 - 25,19	24,19 - 24,49
Risque faible à nul		< 0,5%	> 26,2	> 25,49	> 25,19	> 24,49

Dans le secteur visé, les cotes de crue applicables varient assez peu dans l'espace (section # 10 du modèle du CEHQ, 2006) de sorte que l'ensemble de la zone est soumis au même niveau d'aléa. L'ensemble des jeux de données requis pour les calculs ont été incorporés dans un tableur Excel<sup>MD</sup>. Le tableur en question permettra de produire rapidement des tables de correspondance DMA%-MNT de telle sorte que de telles cartes de risques pourront être aisément produites à volonté dans l'ensemble des secteurs riverains du lac des Deux-Montagnes et pour tous les cas de figures de résidences.

### *Résultats*

Les figures suivantes dévoilent à titre illustratif seulement les résultats évoqués plus haut. L'interprétation sort du contexte particulier de ce rapport. Il est à noter que les résidences actuellement présentes dans le territoire cartographié (Figure 12) ne correspondent pas nécessairement aux cas de figure représentés par les cartes. de sorte qu'il serait hasardeux de statuer sur leur niveau de résilience effectif.

Nous laissons donc le lecteur se faire sa propre opinion sur les possibilités offertes par cette forme de cartographie. Nous proposons tout de même quelques idées concernant les différents modes d'exploitation de cette approche pour la gestion des risques (voir plus loin).

### *Recommandation : vers une ACA générique du risque de dommages directs*

Avant de penser mettre en œuvre ou généraliser l'approche risque proposée dans un cadre règlementaire et cartographique formel (cadre normatif), il pourrait être opportun de réaliser au préalable une analyse générique, un genre d'ACA, dont le but serait d'évaluer, voire de mesurer, le risque encouru avec différentes hypothèses de réglementation de la construction résidentielle en zones exposées à la submersion.

Les termes de références de base seraient notamment les suivants :

1. **L'analyse serait de nature économétrique** avec actualisation des taux d'endommagement sur une durée similaire par exemple à la vie utile des bâtiments (50-100 ans), ou à la durée d'une hypothèque (25-50 ans) à long terme, mais surtout axée sur le principe du **développement durable**
2. **La portée des coûts du risque** doit inclure en plus des dommages directs les composantes secondaires et indirectes: coûts d'intervention, impact fiscal du risque (via l'évaluation municipale), les impacts socio-sanitaires, etc..
3. **L'analyse fréquentielle des crues** devrait prendre en compte (intégrer) toute la gamme des crues possibles assortie d'une probabilité annuelle de survenue (densité de probabilité)
4. Un **principe de précaution** associé à l'**incertitude climatique** doit être inclus
5. **Différents modes d'implantation résidentielle** doivent être pris en compte, notamment à l'égard de la présence ou pas d'un sous-bassement, de son degré d'aménagement et de la hauteur du rez-de-chaussée dans le terrain
6. **Différentes catégories de variabilité du niveau d'eau en crue** sont à considérer : faible, moyen et fort marnage total entre les crues annuelles et les crues extrêmes
7. **Une critériologie d'acceptabilité du risque** doit être recherchée afin de mieux paramétriser la réglementation dans une optique de résilience
8. **Le principe d'équité** doit être considéré en vue d'établir les équilibres financiers des charges assumées à divers niveaux

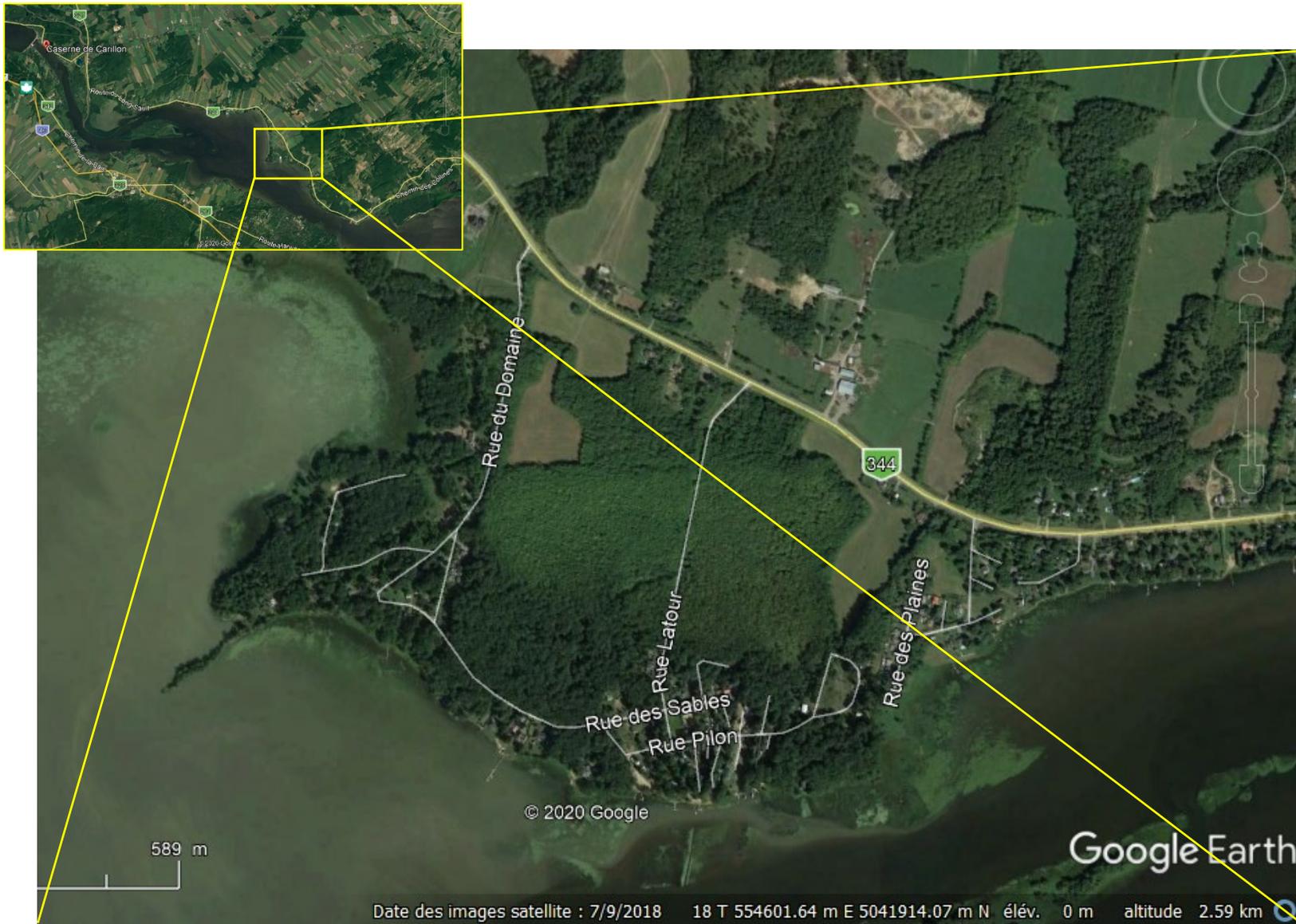


Figure 12 : Secteur riverain visé par les cartes du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre – Baie Carillon (Long-Sault)

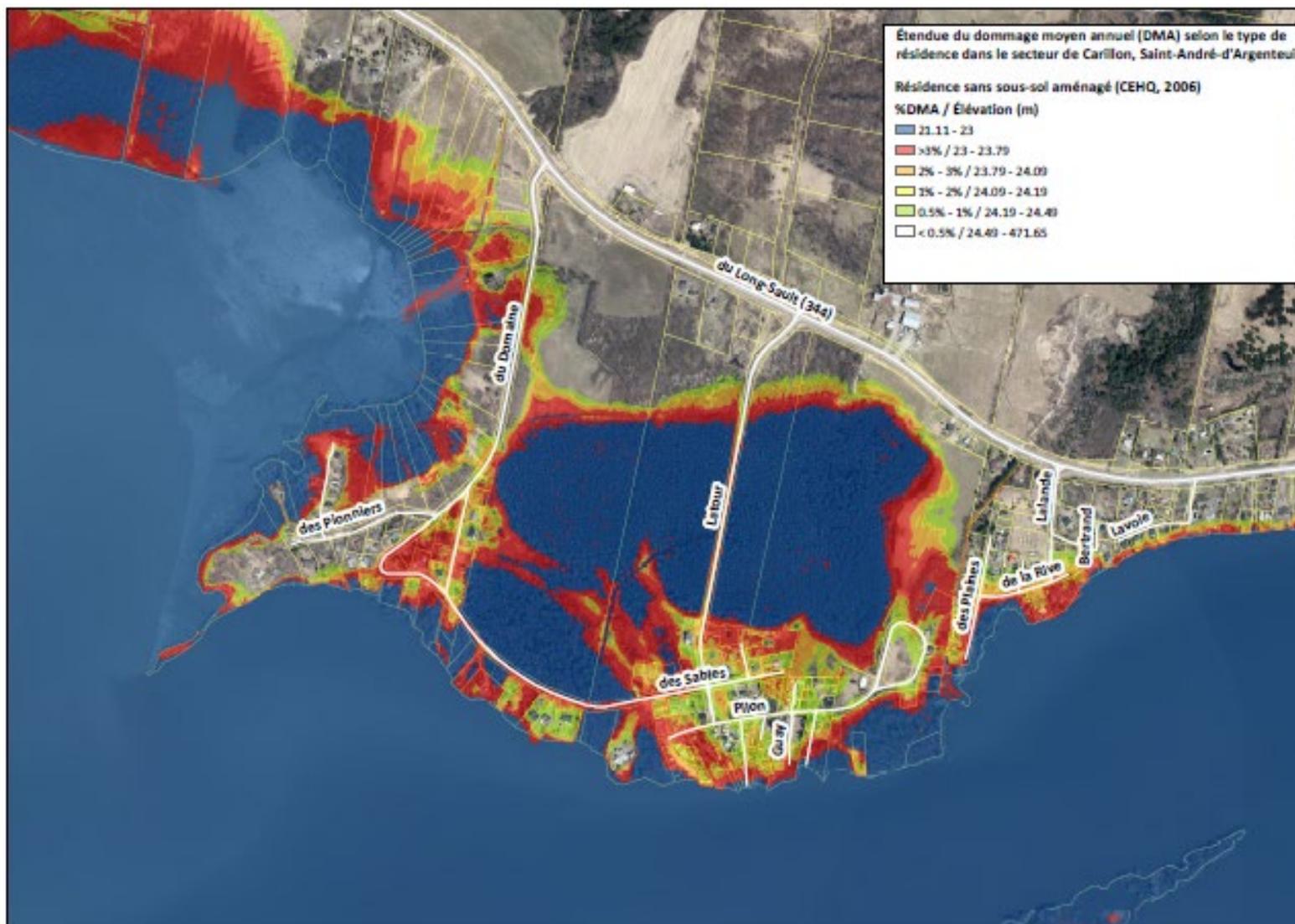


Figure 13 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) sans sous-sol – Baie Carillon (Long-Sault) – Modèle fréquentiel du CEHQ (2006) ou de Favre et coll. (2010)

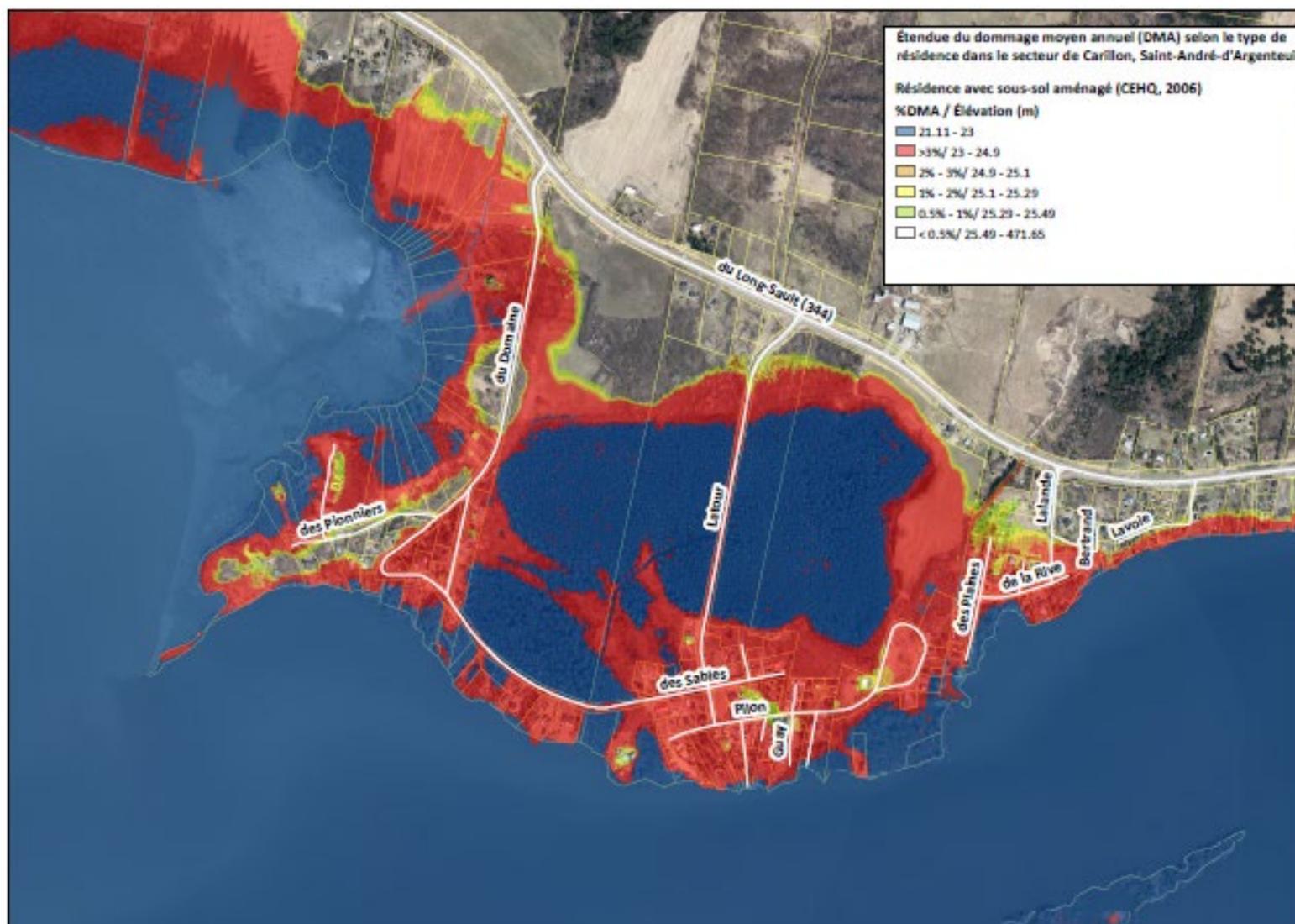


Figure 14 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) avec sous-sol aménagé – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel du CEHQ (2006) ou de Favre et coll. (2010)

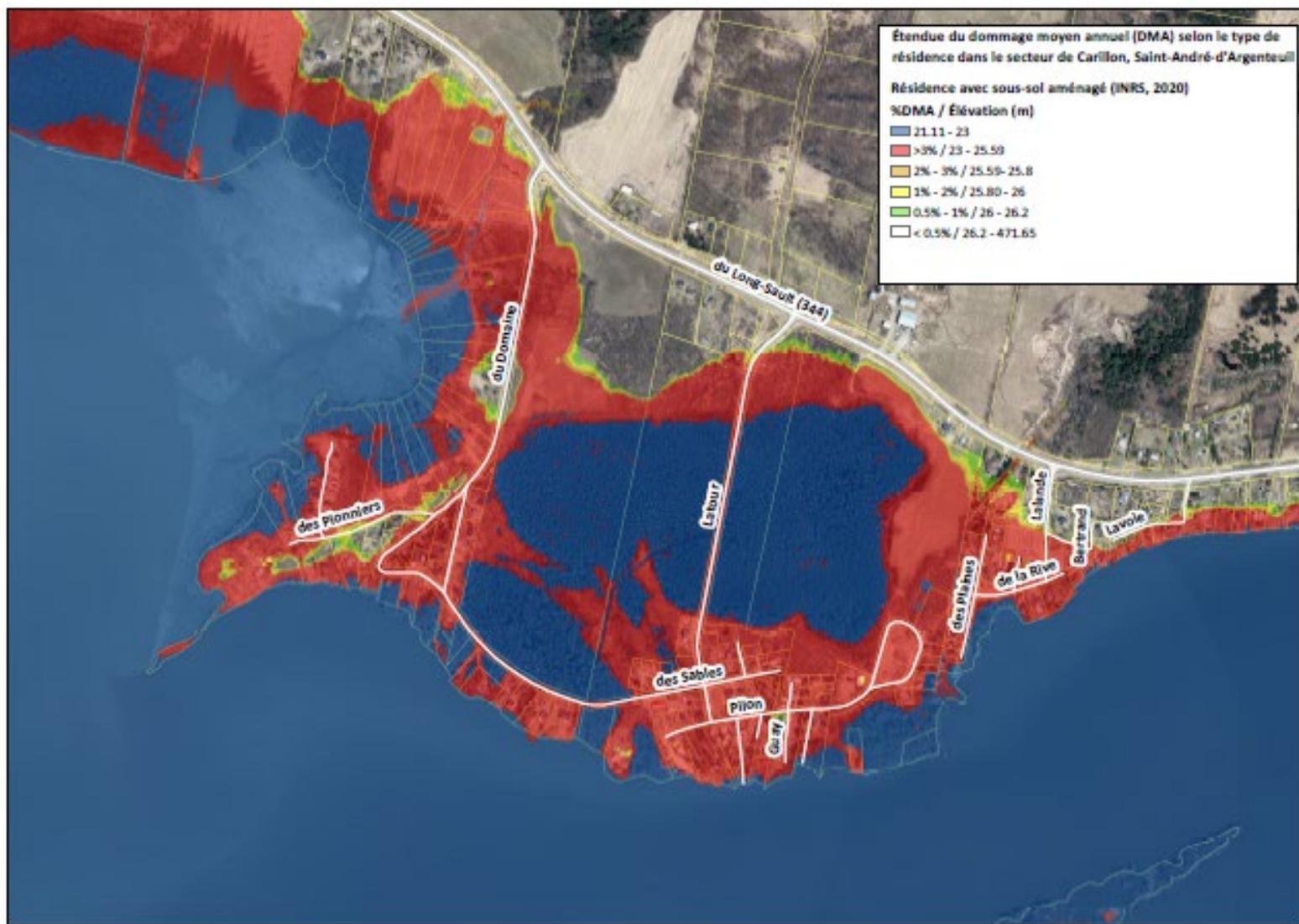


Figure 15 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) avec sous-sol aménagé – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel de l'INRS (Ouarda et Charron, 2010)

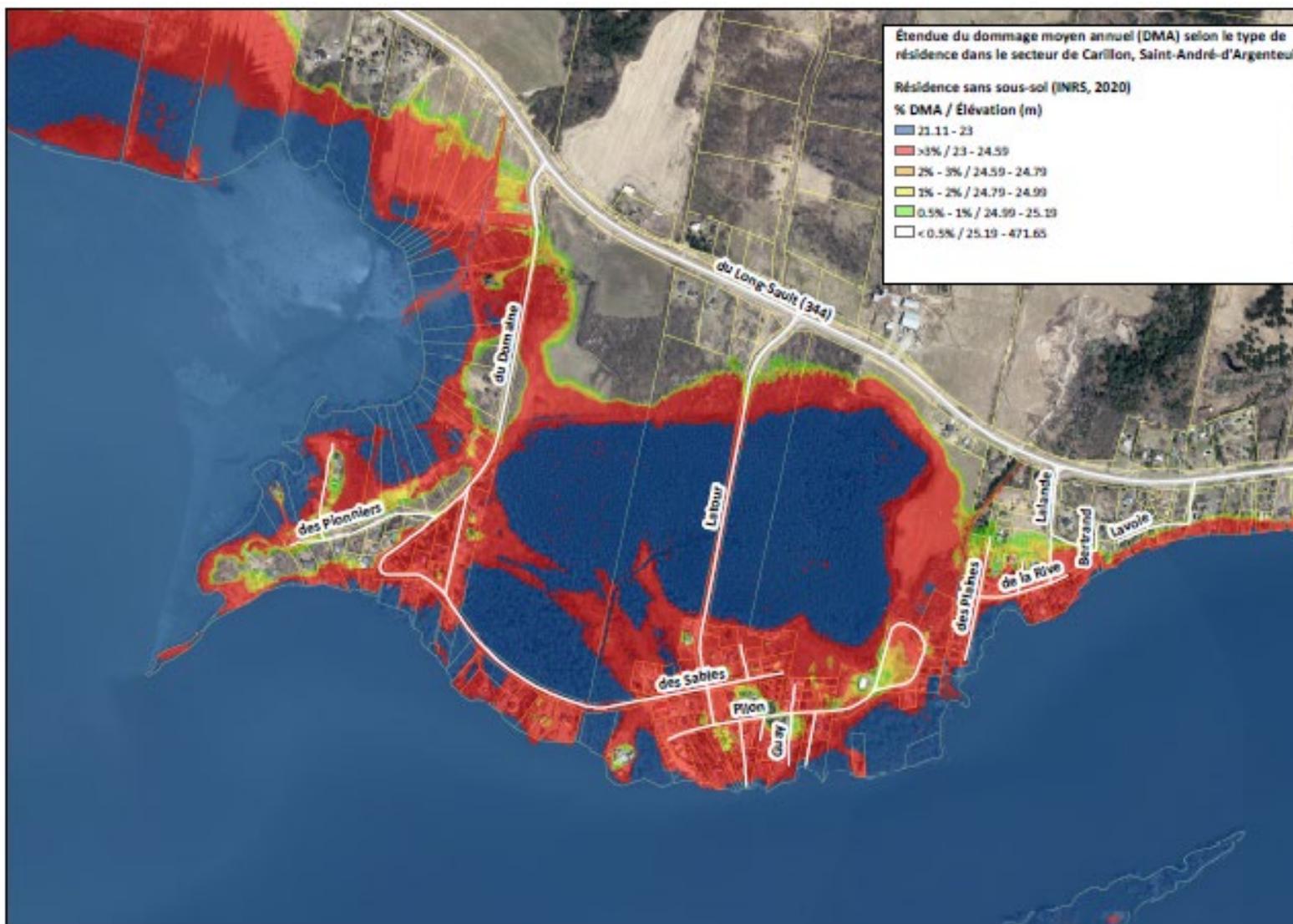


Figure 16 : Carte du risque d'inondation moyen annuel (taux d'endommagement) à l'eau libre pour une résidence à un étage (bungalow) sans sous-sol – Baie Carillon (Long-Sault) - Modèle fréquentiel de l'INRS (Ouarda et Charron, 2010)

## Possibilités offertes par l'approche CRUE

**Faisabilité, transférabilité.** L'adaptation ou généralisation du tableur Excel<sup>MD</sup> à d'autres cours d'eau ou bassins versants ne représente aucune difficulté à partir du moment où un modèle de terrain (MNT) précis y est disponible, qu'un modèle hydraulique validé existe et produit des résultats de niveau d'eau variés pour la gamme des crues problématiques et que les paramètres fréquentiels généraux sont connus, soit sous la forme de quantiles de crue, ou encore via une fonction de densité de probabilité. Notons que l'approche n'accorde aucune importance normative à de quelconques quantiles puisque toute la gamme des crues est prise en compte. En 2021, ces conditions de base sont toutes réunies sur une multitude de cours d'eau, notamment dans les régions urbanisées du Québec, avec les travaux réalisés par les huit équipes conventionnées par le MAMH pour la cartographie de zones inondables.

**Cadre normatif.** Dans un premier temps, un tel outil directement connecté sur Arc-GIS devrait permettre la réalisation de certaines analyses de base (projets pilotes de type ACA) relatives au niveau de risque que la PPRLPI a conduit à accepter. Ce genre d'analyse devrait aider à statuer le **caractère normatif** de la gestion des zones inondables (**cadre normatif**).

**Développement de la résilience.** Si l'on cherche à améliorer la résilience du bâti en zones inondables, on disposera d'un outil particulièrement bien adapté pour évaluer le risque associé à toutes sortes d'option d'implantation : niveau du terrain, niveau de RC, type de sous-sol.

**Impact des changements climatiques.** Dans l'hypothèse où les changements climatiques pourraient entraîner une dérive fréquentielle des aléas de crue (probabilité de crues exceptionnelles), l'approche permettra d'évaluer directement l'impact sur le risque accepté et possiblement de prévenir une dérive inacceptable en implantant un principe de précaution paramétrisable.

**La gestion intégrée de l'eau par BV.** Dans le même ordre d'idée, il sera également possible de mesurer à l'échelle d'un grand territoire (ex : les MRC et la CMM -vs- la CMI ou la CPRRO) l'impact de différentes options de régularisation des débits et niveaux d'eaux (Saint-Laurent, Outaouais) lorsque des ouvrages de retenue le permettent. L'outil devient alors une composante précieuse pour concrétiser le volet risque de la gestion intégrée de l'eau à l'échelle des bassins versants (GIEBV).

**Les analyses coûts/avantages de projet d'atténuation des risques (ACA).** Il en est de même pour la réalisation d'ACA pour des projets d'aménagement (approches structurelles) visant l'atténuation directe des risques via le contrôle des aléas.

**En somme, l'approche risque telle que représentée par la méthode CRUE permet d'appréhender les conséquences des crues avec une critériologie qui est à la fois qualitative (langage commun), quantitative (monétisée) et visuellement communicative (cartographie, géomatique). On peut donc envisager de passer du simple discours relié au risque à une concrétisation pratique dans différents contextes reliés à la gestion des risques.**

## Autres perspectives de la cartographie – Les urgences

Il est aussi notable que les risques d'inondation ne limitent pas aux dommages directs infligés au secteur résidentiel. L'analyse spatiale des crues passe aussi par une approche dynamique axée sur les scénarios de survenue, lesquels interpellent directement les opérations d'urgence. Les phases critiques de la crue, sa durée, son point culminant et son mode de propagation dans le terrain sont des données importantes à considérer pour la planification des mesures d'urgence et l'estimation des coûts à prévoir. Certaines inondations ne causent pas nécessairement des dommages directs mais elles peuvent tout de même, en isolant les populations, forcer leur évacuation pour des durées significatives. Cette composante du risque

n'est pas négligeable et la cartographie dynamique en temps réel, prévisionnel ou différé peut grandement aider à prévenir des dommages indirects graves.

Document de travail