



Institut de recherche sur les infrastructures  
résilientes et circulaires

# Rapport des résultats

## Adaptation aux changements climatiques en zones côtières canadiennes : un cadre basé sur l'intelligence artificielle

Subvention pour professeures et professeurs en début de carrière - 2024

**Document réalisé pour :**

Institut AdapT

**Document réalisé par :**

Prof. Reda Snaiki

Saeed Saviz Naeini (étudiant au doctorat)

**Contact :**

reda.snaiki@etsmtl.ca

Le 29-05-2026

## TABLE DES MATIÈRES

<b>MESSAGE PRINCIPAL</b>	<b>3</b>
<b>RAPPEL DU PROJET ET OBJECTIFS ATTEINTS</b>	<b>3</b>
<b>RÉSULTAT 1 - ÉVALUATION ACTUELLE ET PROJÉTÉE DU RISQUE D'INONDATION</b>	<b>3</b>
<b>RÉSULTAT 2 - QUANTIFICATION DES DOMMAGES À L'ÉCHELLE DU BÂTIMENT</b>	<b>5</b>
<b>RÉSULTAT 3 - OPTIMISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION</b>	<b>7</b>
<b>RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION ET VALEUR AJOUTÉE POUR L'ADAPTATION</b>	<b>8</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>9</b>
<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>10</b>

## Message principal

Le projet a permis de passer d'une problématique d'adaptation côtière à une chaîne complète de décision : simulation rapide des aléas, estimation probabiliste du risque, cartographie des dommages au bâtiment et optimisation de mesures de protection sous climat futur.

## Rappel du projet et objectifs atteints

Le projet visait à aider les municipalités et communautés côtières canadiennes à mieux anticiper les risques de submersion associés aux tempêtes extrêmes et à l'élévation du niveau de la mer. Deux objectifs structuraient la proposition : (i) calculer le risque d'inondation pour les régions étudiées selon différents scénarios climatiques et (ii) développer une approche d'adaptation permettant d'identifier des actions optimales en fonction de leur performance, de leur coût et des contraintes de mise en œuvre.

Les travaux réalisés, en grande partie intégrés dans la thèse doctorale de Saeed Saviz Naeini, ont permis de développer et de valider un cadre multi-aléas combinant des tempêtes synthétiques, des modèles d'IA pour les aléas côtiers, des inventaires d'exposition à l'échelle du bâtiment, des fonctions de vulnérabilité et une optimisation par apprentissage par renforcement profond.

Volet	Résultat obtenu
Évaluation du risque	Cadre probabiliste couplant tempêtes synthétiques, surcote, inondation, exposition et vulnérabilité.
Résolution spatiale	Passage d'une analyse régionale à une cartographie à l'échelle du bâtiment pour identifier les zones prioritaires.
Adaptation	Optimisation de murs/digues de protection à travers des scénarios historiques, proches futurs et lointains futurs.
Formation et diffusion	Résultats consolidés dans une thèse doctorale et dans des articles scientifiques associés.

## Résultat 1 - Évaluation actuelle et projetée du risque d'inondation

Le premier résultat majeur est la construction d'une plateforme d'évaluation du risque capable de comparer le climat historique, le proche futur et le futur lointain. Les simulations s'appuient sur de

grands ensembles de trajectoires synthétiques de cyclones tropicaux, couplés à des modèles d'aléas côtiers et à l'élévation projetée du niveau de la mer. Le cadre a été appliqué à l'Atlantique canadien et détaillé localement sur Charlottetown, Î.-P.-É., afin de quantifier les profondeurs d'eau, l'exposition des bâtiments et les pertes attendues.

Les résultats montrent que l'élévation du niveau de la mer est le multiplicateur dominant du risque. À l'échelle régionale, un événement de surcote ayant historiquement une période de retour de 100 ans pourrait se produire en moyenne tous les 43 ans dans le futur lointain. À l'échelle locale, les cartes d'inondation montrent une progression nette des zones touchées vers des secteurs résidentiels et commerciaux intérieurs.

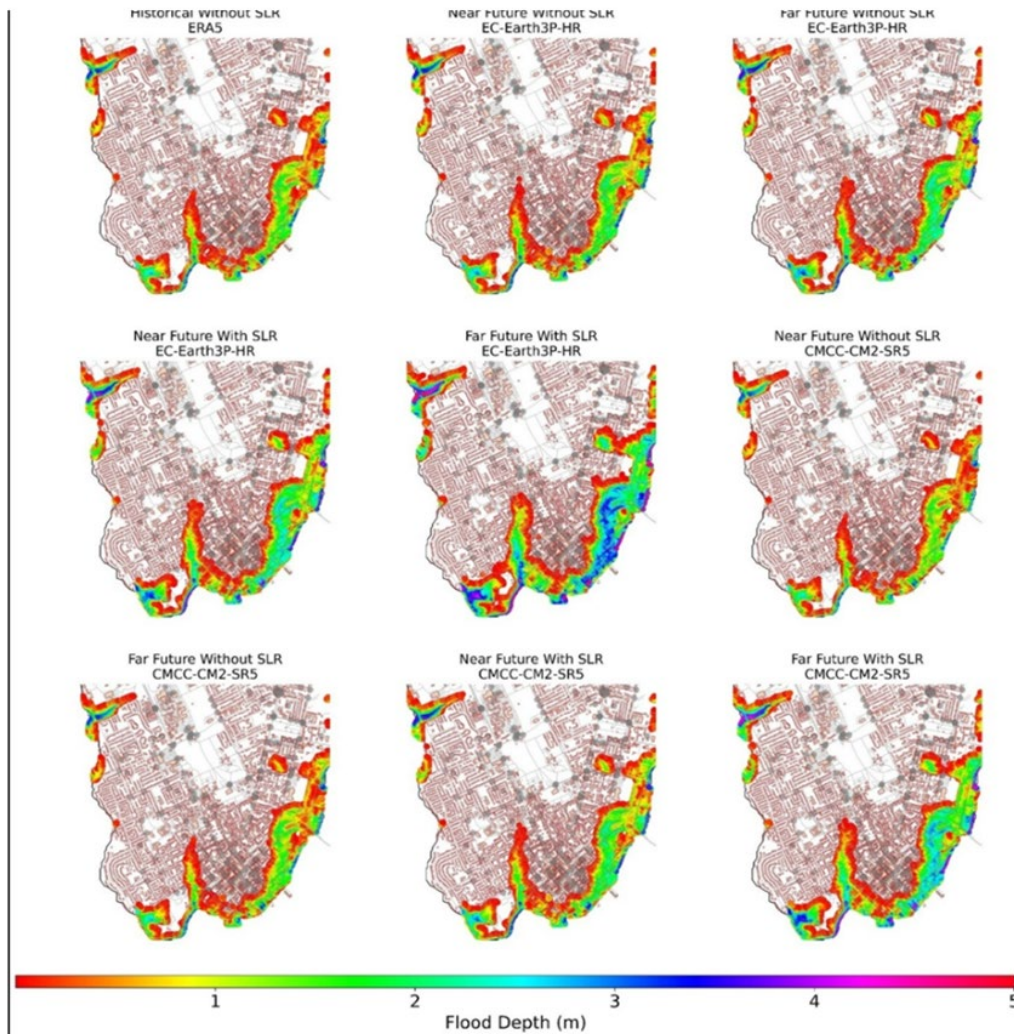


Figure 1. Profondeurs d'inondation centennales à Charlottetown selon les scénarios climatiques et l'inclusion de la hausse du niveau marin. Source : Saviz Naeini (2026).

Indicateur	Historique	Futur avec SLR	Lecture opérationnelle
Surcote régionale	Période de retour historique : 100 ans	≈ 43 ans dans le futur lointain	Les événements extrêmes deviennent plus fréquents.
Étendue de l'inondation centennale	Référence historique	+59 % avec SLR (EC-Earth3P-HR)	L'élévation du niveau marin domine l'évolution du risque.
Profondeur maximale	Référence historique	+42 % avec SLR (EC-Earth3P-HR)	Les dommages augmentent même pour des zones déjà exposées.
Bâtiments touchés - événement 100 ans	≈ 375 bâtiments	≈ 815 (EC-Earth3P-HR) ; ≈ 651 (CMCC-CM2-SR5)	La charge sur les services municipaux et l'assurance augmente fortement.

## Résultat 2 - Quantification des dommages à l'échelle du bâtiment

Le cadre ne se limite pas à produire des cartes d'aléas. Il estime les dommages physiques structure par structure en combinant les profondeurs d'inondation avec un inventaire généré par IA et des fonctions profondeur-dommage de type HAZUS. Cette approche rend le résultat directement exploitable pour prioriser les zones où une intervention, un renforcement ou une révision de l'aménagement est nécessaire.

Pour l'événement de retour 700 ans, le ratio moyen de dommage par bâtiment affecté passe de 37 % en conditions historiques à 49 % dans le futur lointain avec élévation du niveau de la mer selon EC-Earth3P-HR. L'analyse montre aussi un basculement de la distribution des dommages : pour l'événement centennal, la part des bâtiments en dommage substantiel (> 50 %) passe d'environ 1 % en historique à 17 % dans le futur lointain avec SLR selon EC-Earth3P-HR, et à 11 % selon CMCC-CM2-SR5.

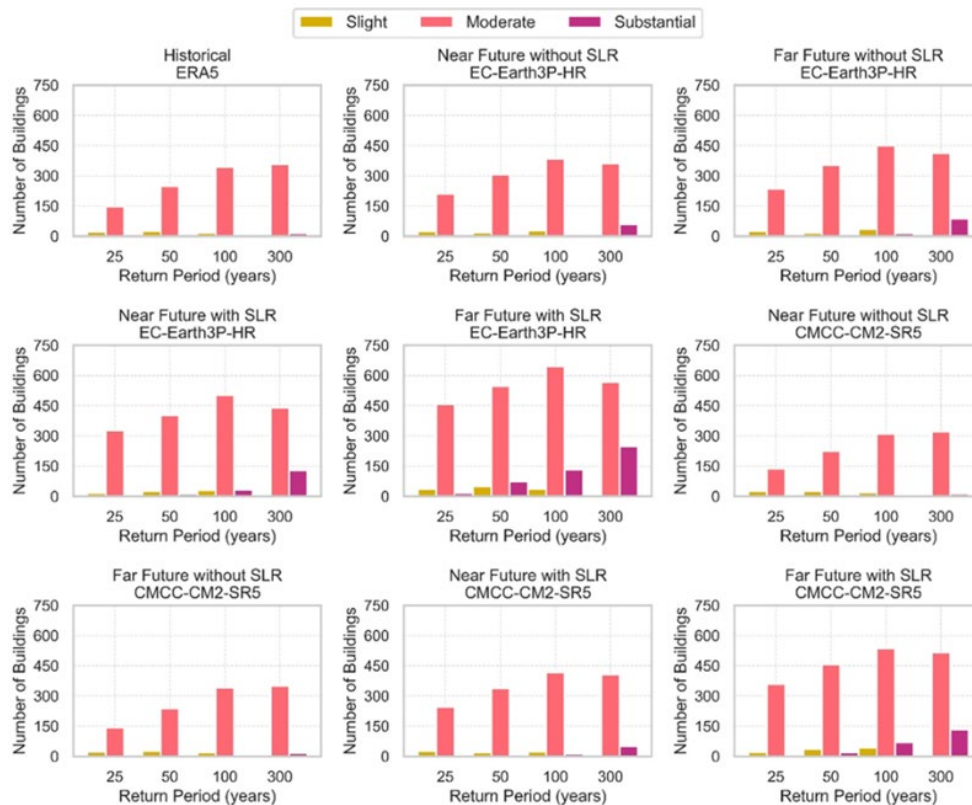


Figure 2. Évolution du nombre de bâtiments par classe de dommage pour différents scénarios et périodes de retour. Source : Saviz Naeini (2026).

### Apport du projet pour la décision locale

Les résultats permettent d'identifier non seulement les zones inondées, mais aussi les secteurs où la profondeur d'eau franchit un seuil de dommage majeur. Cette information est plus utile pour l'adaptation municipale qu'une simple carte d'emprise d'inondation, car elle relie l'aléa aux conséquences physiques attendues.

### Résultat 3 - Optimisation des stratégies d'adaptation

Le second volet du projet a été réalisé à travers un cadre d'optimisation hybride appelé EG-DQN, qui combine des algorithmes génétiques avec un Deep Q-Network. L'objectif est de choisir la hauteur et la localisation de segments de murs/digues de protection en tenant compte du coût, de la performance et de la continuité des investissements dans le temps.

Horizon	Statique : coût / aire inondée	Adaptatif : coût / aire inondée	Interprétation
Historique	10,75 M\$ / 4,78 km <sup>2</sup>	10,75 M\$ / 4,78 km <sup>2</sup>	Point de départ commun.
Proche futur	17,50 M\$ / 5,30 km <sup>2</sup>	19,75 M\$ / 5,08 km <sup>2</sup>	L'option adaptative coûte plus cher mais réduit mieux l'aire inondée.
Futur lointain	23,25 M\$ / 5,57 km <sup>2</sup>	30,00 M\$ / 5,00 km <sup>2</sup>	La planification adaptative évite des choix irréalistes à long terme.

## Résultats de l'optimisation et valeur ajoutée pour l'adaptation

L'application aux Îles de la Madeleine montre que l'optimisation statique est moins coûteuse à court terme, mais qu'elle ne respecte pas toujours la logique d'évolution réelle des infrastructures. Le scénario adaptatif impose que les protections puissent être renforcées ou maintenues au fil des horizons climatiques, ce qui reflète mieux la planification d'investissements publics. En contrepartie d'un coût plus élevé, il réduit l'aire inondée dans les scénarios futurs et fournit une trajectoire d'adaptation plus crédible.

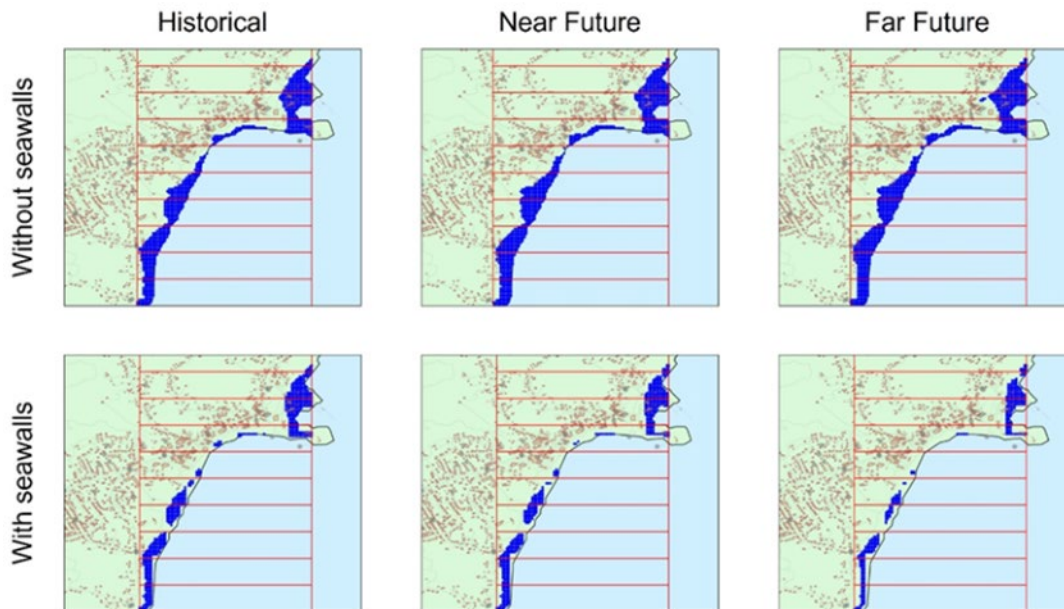


Figure 3. Effet des murs/digues adaptatifs sur les zones inondées aux Îles de la Madeleine, selon les horizons climatique historique, proche futur et futur lointain. Source : Saviz Naeini (2026).

## Conclusion

Le projet a produit une contribution concrète à l'adaptation côtière : un cadre intégré reliant aléas climatiques, exposition, vulnérabilité, pertes et optimisation des mesures de protection. Les résultats confirment que la hausse du niveau marin doit être traitée comme un facteur central de décision et que les stratégies d'adaptation doivent être planifiées de manière évolutive plutôt qu'en fonction du seul climat historique. Le cadre développé constitue une base transférable pour appuyer les municipalités, les planificateurs et les décideurs dans la priorisation d'investissements résilients face aux risques côtiers futurs.

## Références

- Naeini, S.S., Snaiki, R. and Di Luca, A., 2026. Projecting hurricane risk in Atlantic Canada under climate change. *Weather and Climate Extremes*, p.100897.
- Saviz Naeini, S., 2026. A multi-hazard cyclone risk framework to enable resilience-informed decision (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- Saviz Naeini, S., Snaiki, R. and Wu, T., 2025. Advancing spatio-temporal storm surge prediction with hierarchical deep neural networks. *Natural Hazards*, 121(14), pp.16317-16344.
- Naeini, S.S. and Snaiki, R., 2024. A novel hybrid machine learning model for rapid assessment of wave and storm surge responses over an extended coastal region. *Coastal Engineering*, 190, p.104503.
- Naeini, S.S. and Snaiki, R., 2024. A physics-informed machine learning model for time-dependent wave runup prediction. *Ocean Engineering*, 295, p.116986.