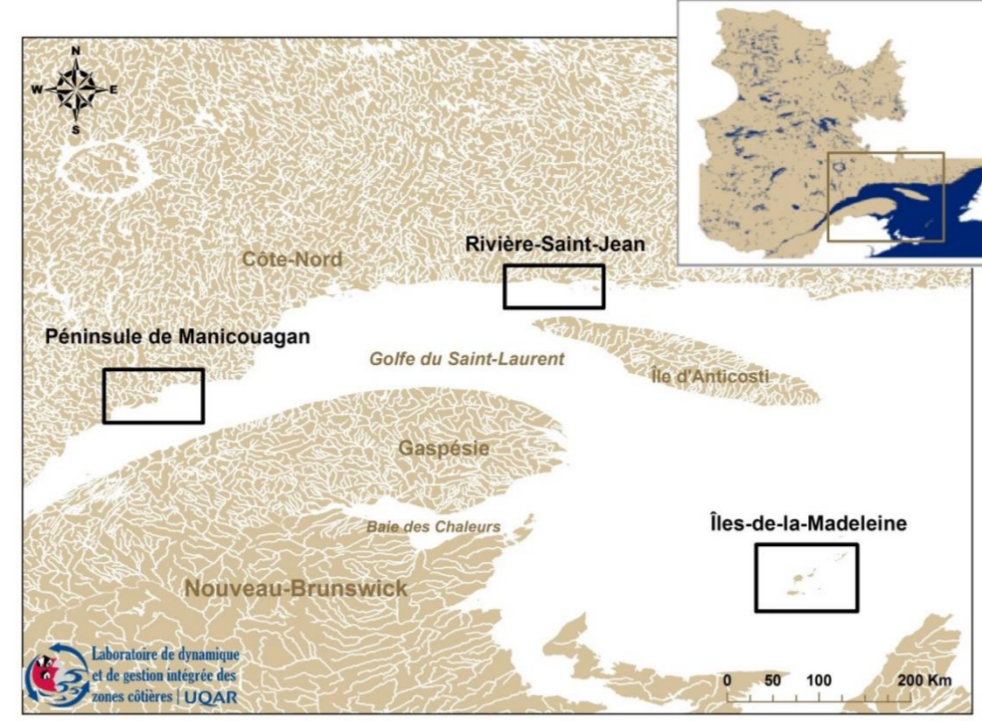


# MODÉLISATION DES GLACES DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-LAURENT DANS LA PERSPECTIVE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

## 1. Objectifs

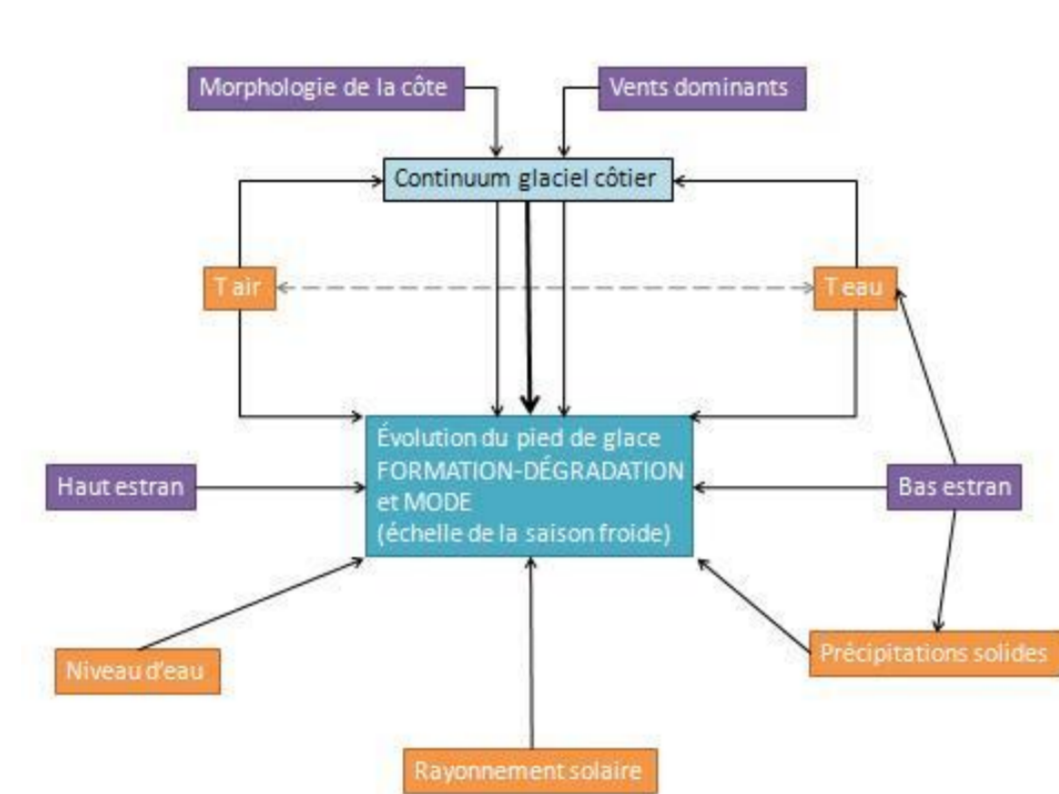
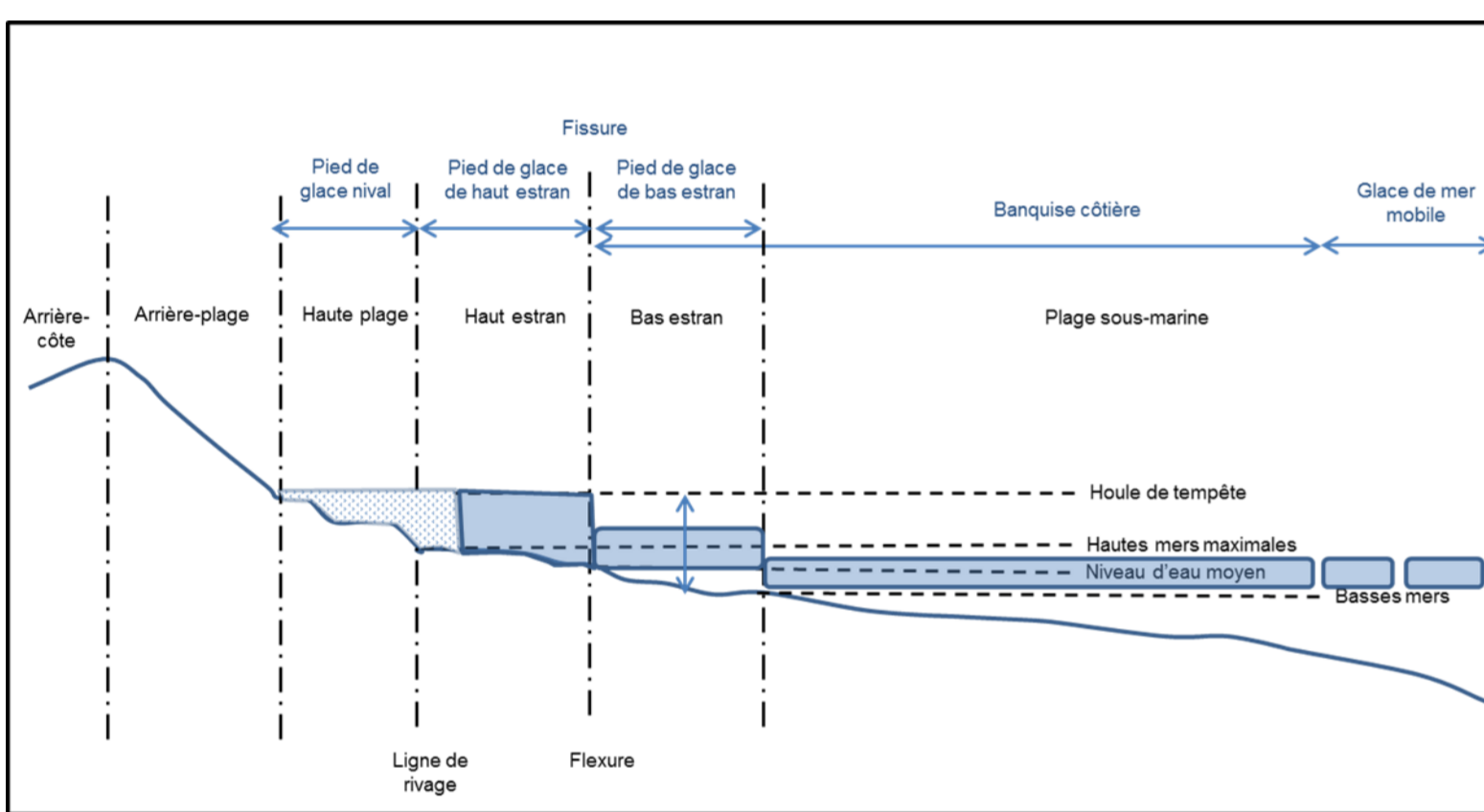
- À l'aide des observations sur la période 2008-2012, décrire l'évolution du pied de glace (PDG) de haut estran sur des sites choisis afin de comprendre les paramètres influençant ce dernier. Ces observations servent aussi à diverses simulations.
- Établir le climat des glaces de mer pour le passé récent (période 1982-2011) et le futur (2041-2070) sur l'ensemble de l'estuaire du Saint-Laurent (ESL) et du golfe du Saint-Laurent (GSL).
- Établir des relations empiriques entre les variables environnementales simulées par le modèle et les observations du PDG. Ces relations empiriques seront ensuite utilisées pour simuler le PDG du futur à l'aide des résultats du simulateur numérique.
- Faire des observations synoptiques de l'ESL et du GSL afin de déterminer la portée des relations empiriques établies aux sites d'observations.
- Généraliser la méthode de projection du climat de glace de rive pour l'ESL et le GSL en incluant dans le modèle numérique existant les mécanismes responsables de la formation et du maintien de la glace de rive.



## 2. Observations d'englacement du haut estran

Voici, en bas à gauche, la représentation schématique du complexe glaciaire côtier sur une côte basse meuble. Un intérêt particulier a été porté au PDG de haut estran en raison de son rôle dans les processus d'érosion côtière. Les observations du PDG de haut estran et des paramètres environnementaux et géomorphologiques ont permis de :

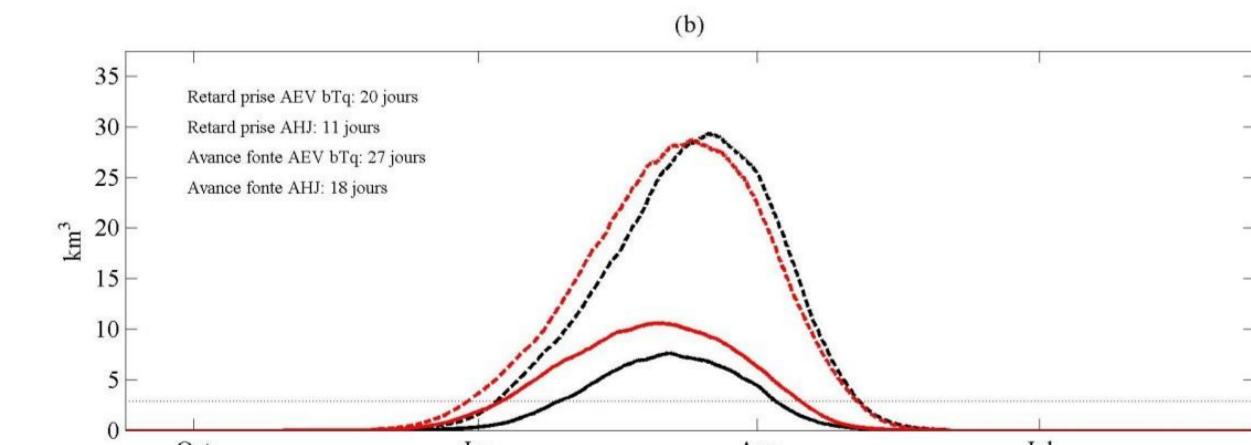
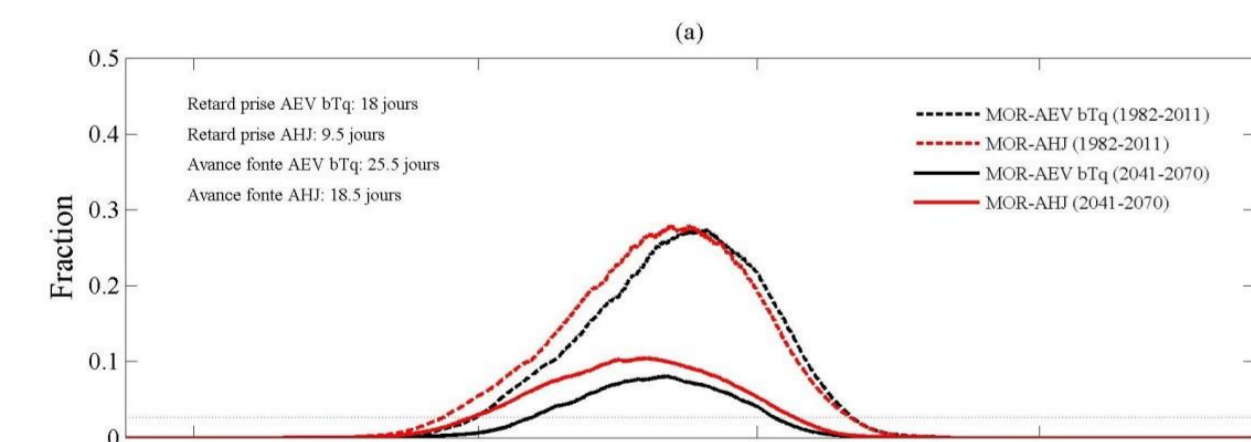
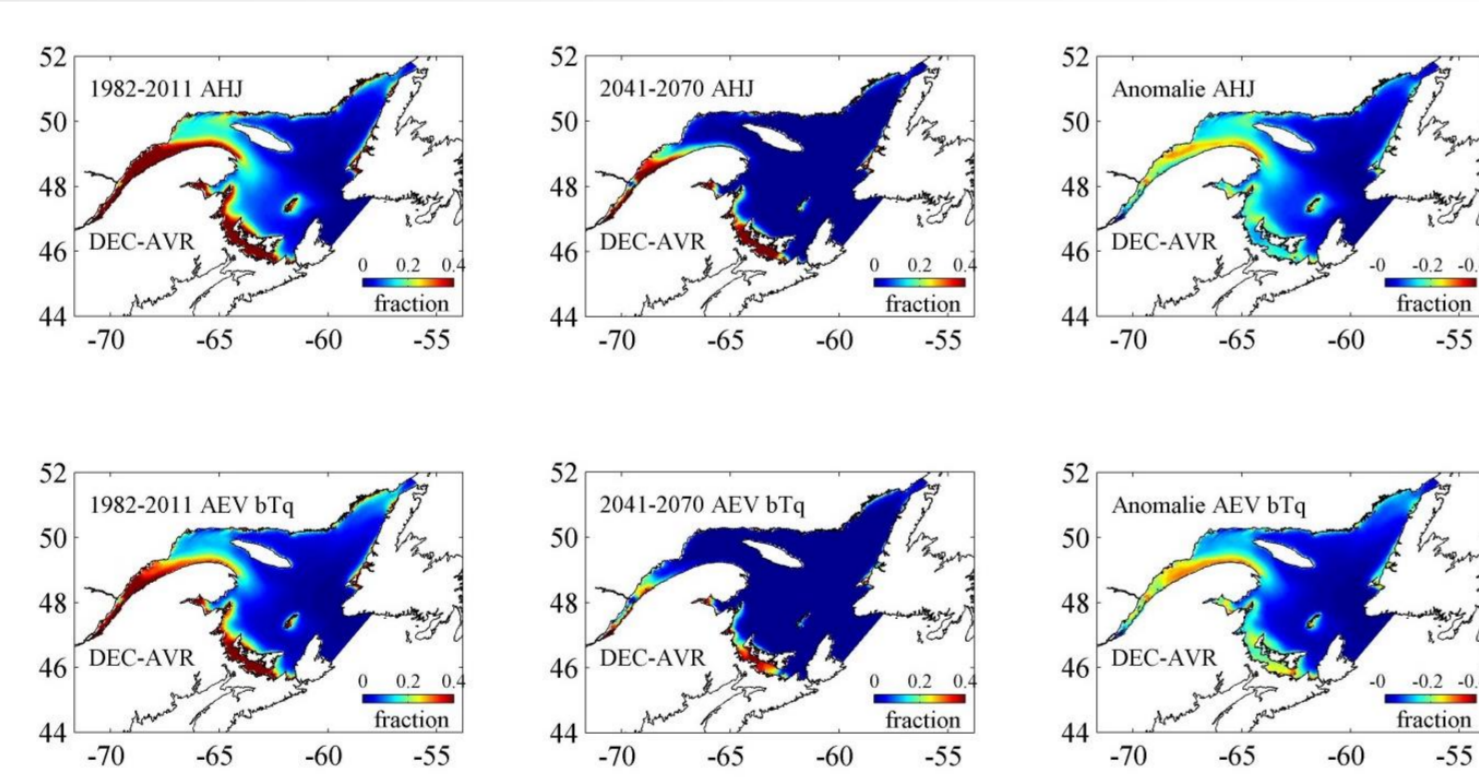
- Améliorer la compréhension des relations entre les différents paramètres et la formation et la dégradation du PDG de haut estran (voir figure en bas à droite).
- Construire des relations empiriques entre l'évolution du PDG de haut estran et les paramètres environnementaux simulés.



## 3. Modélisation de la glace de mer et du PDG 1981-2070

Trois simulations ont été réalisées, à l'aide d'un simulateur océan-glace de mer :

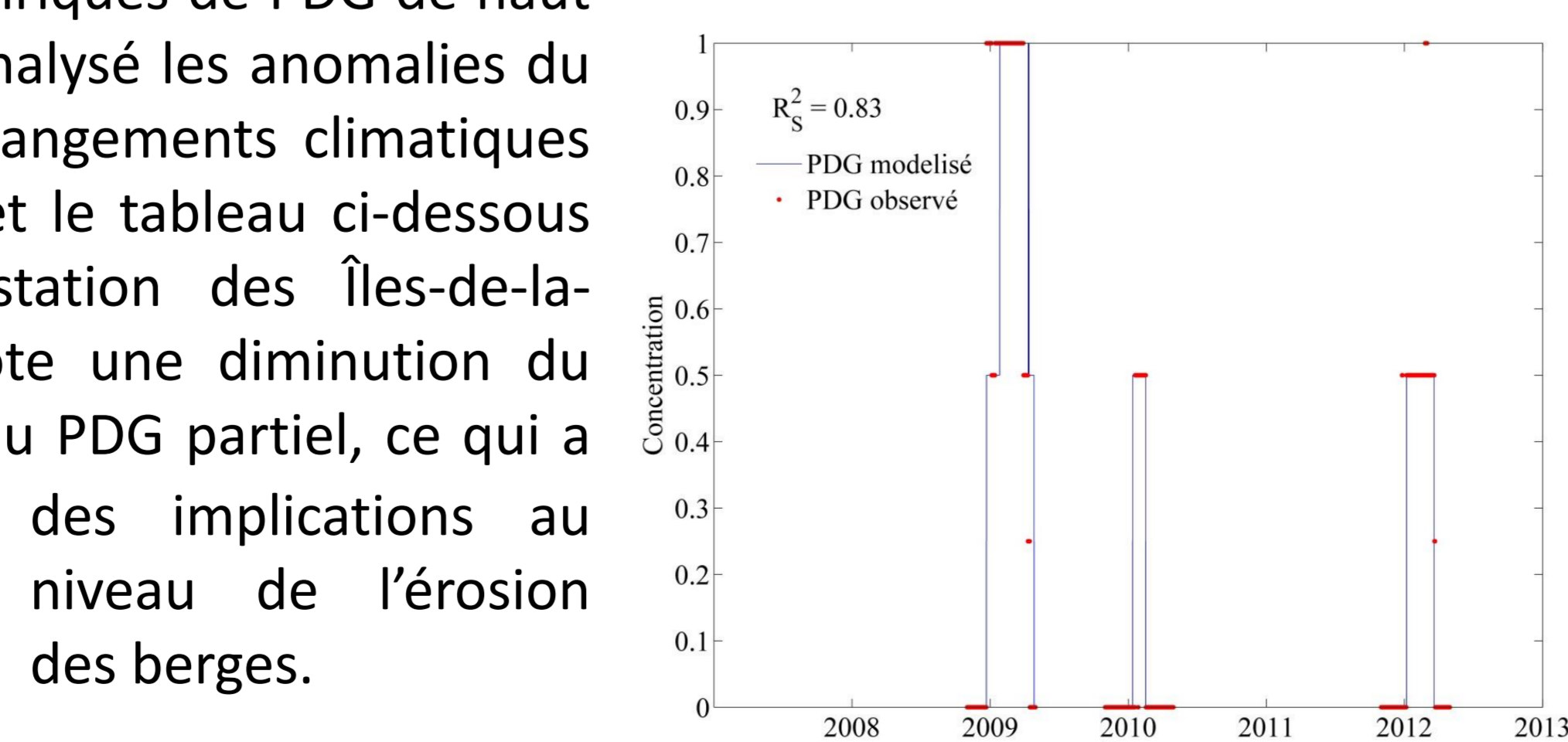
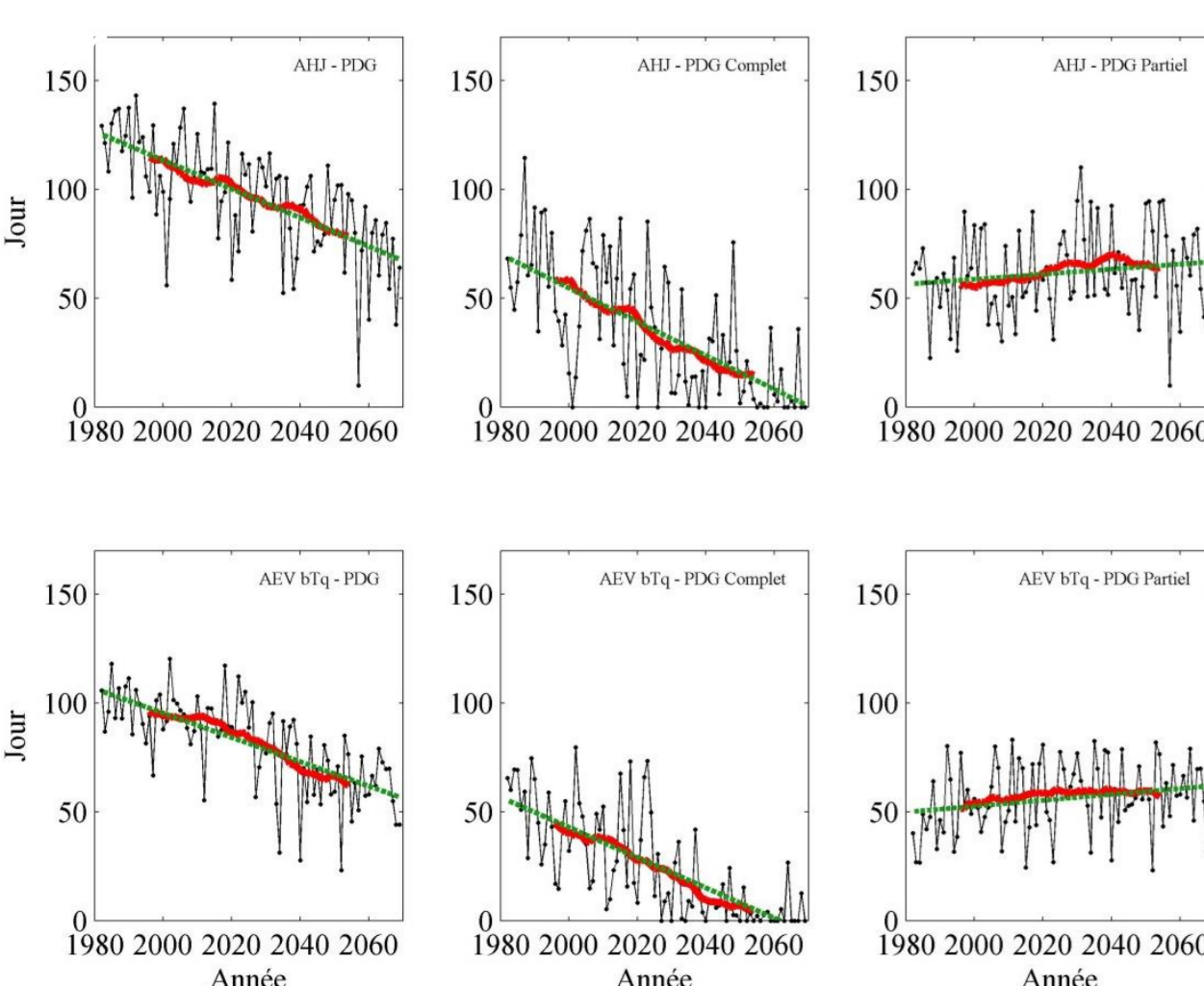
- Simulation réaliste avec des forçages de GEM (2001-2012)
- Simulation climatique avec des forçages du MRCC AHJ (1981-2070)
- Simulation climatique avec des forçages du MRCC AEV débiaisée (1981-2070)



Nous présentons les résultats des simulations climatiques de glace de mer (sur le domaine, en haut et sa climatologie, à gauche). Le tableau ci-dessous présente les variations de la durée de la saison de glace en fonction de sa concentration et de son volume entre le passé récent et le futur.

Simulation	Concentration de GDM				Volume de GDM			
	Retard prise (jours)	Avance fonte (jours)	Δ total (jours)	Δmax (%)	Retard prise (jours)	Avance fonte (jours)	Δ total (jours)	Δmax (%)
AHJ	-9,5	-18,5	-28	-63	-11	-18	-29	-63
AEV bTq	-18	-25,5	-43,5	-70	-20	-27	-47	-74
Moyenne	-13,75	-22	-35,75	-66,5	-15,5	-22,5	-38	-68,5

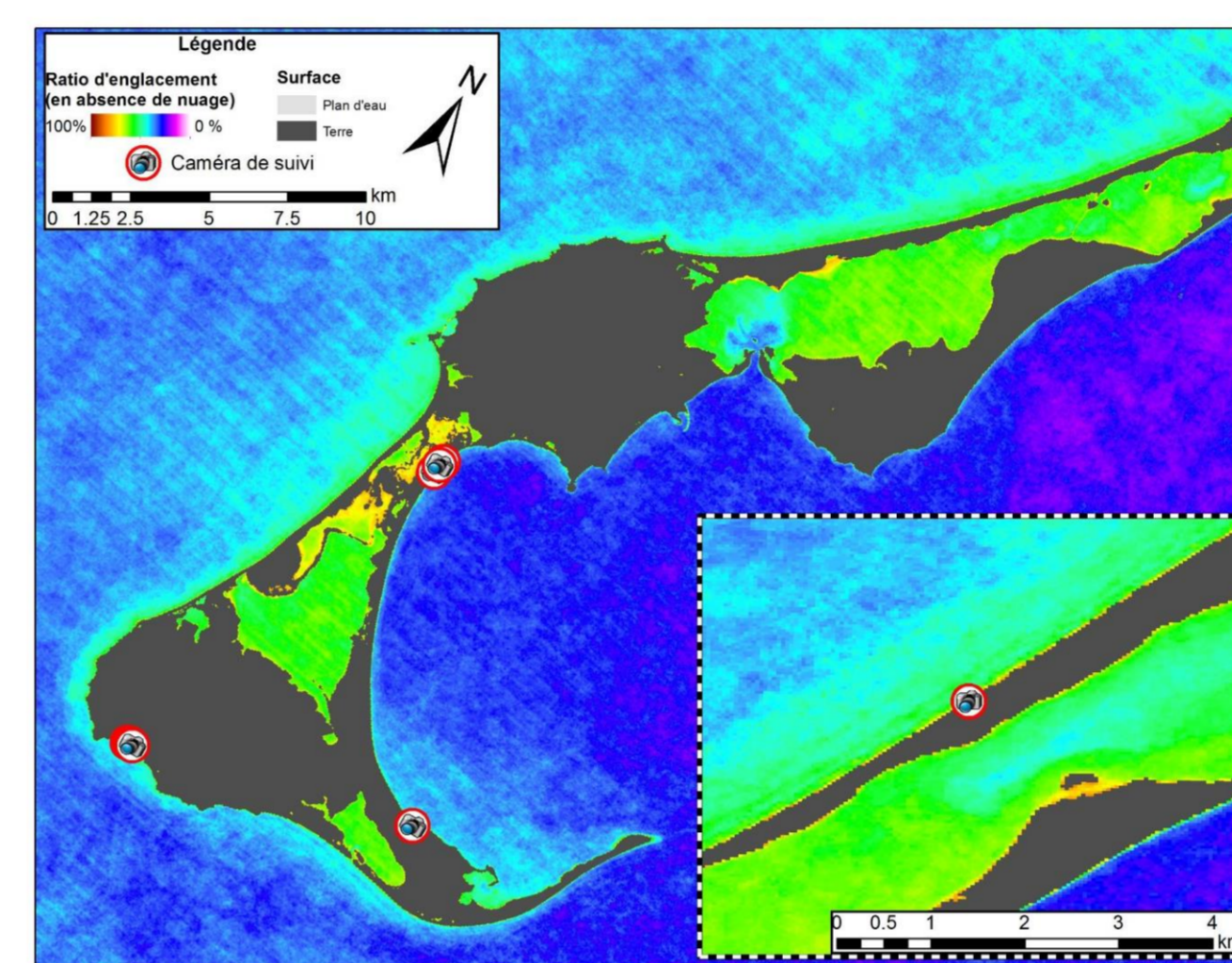
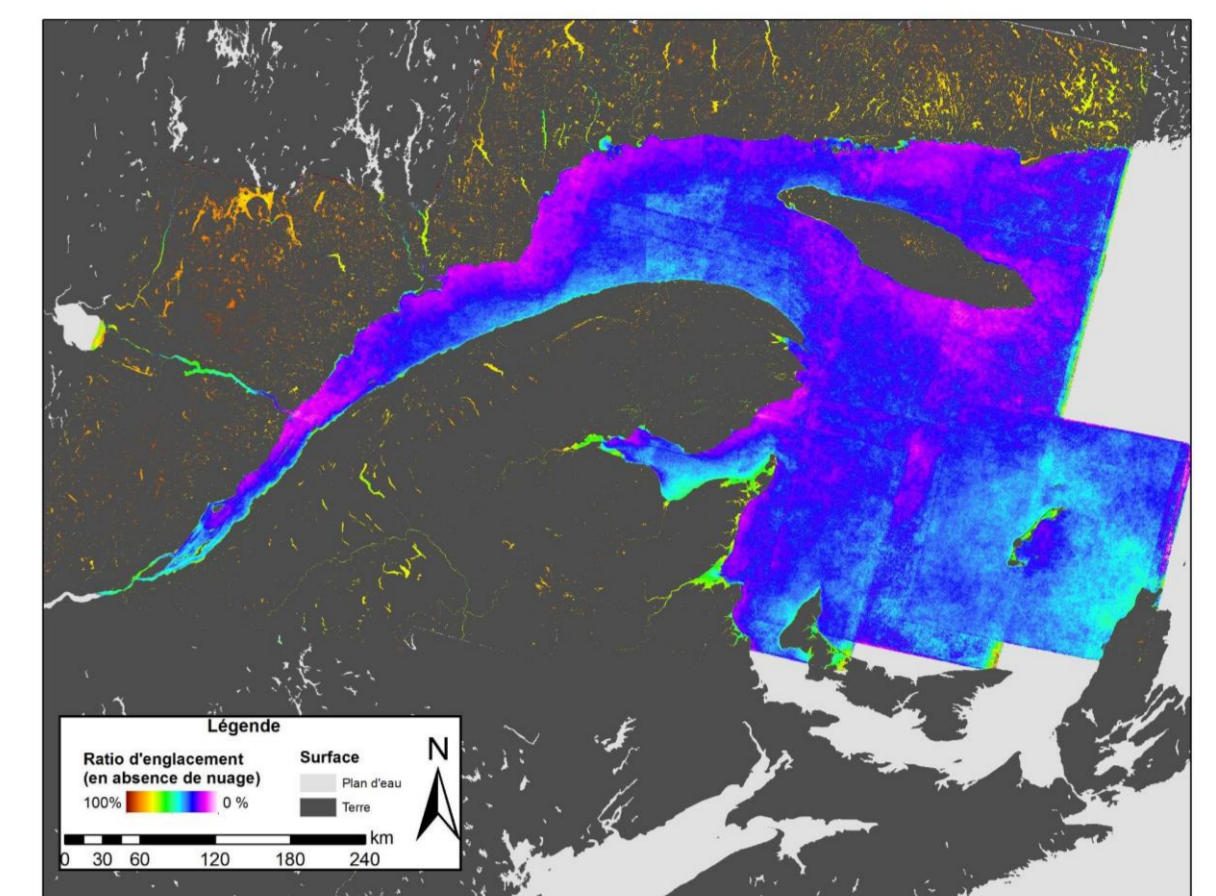
Par la suite, à l'aide des relations empiriques de PDG de haut estran (figure à droite), nous avons analysé les anomalies du PDG de haut estran résultant des changements climatiques (2041-2070 – 1981-2010). La figure et le tableau ci-dessous présentent les résultats pour la station des Îles-de-la-Madeleine, Pointe-aux-Loups. On note une diminution du PDG complet et une augmentation du PDG partiel, ce qui a des implications au niveau de l'érosion des berges.



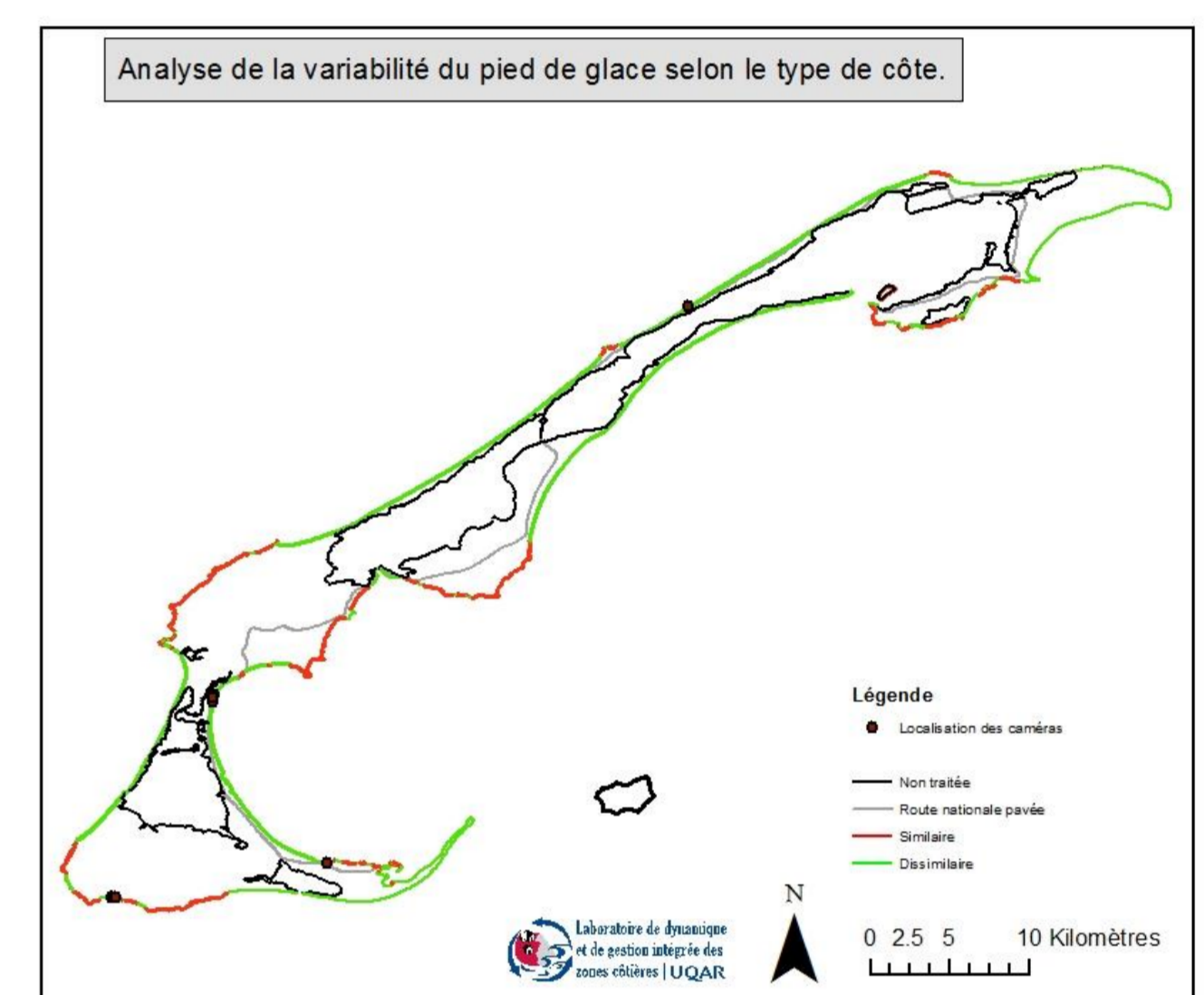
Simulation	PDG		PDG COMPLET		PDG PARTIEL	
	Δ (jours)	taux (jours/année)	Δ (jours)	taux (jours/année)	Δ (jours)	taux (jours/année)
AHJ	-36,1	-0,66	-43,5	-0,78	7,5	0,12
AEV bTq	-34,3	-0,56	-40,0	-0,69	5,6	0,14
Moyenne	-35,2	-0,61	-41,8	-0,74	6,5	0,13

## 4. Analyse spatiale du complexe glaciaire côtier dans l'EGSL par imagerie satellitaire

Afin de déterminer la portée spatiale des résultats obtenus pour un site, nous devons trouver une façon de comparer les observations faites en une station avec les côtes avoisinantes. L'imagerie satellitaire (Landsat et Radarsat-2, Quad-Pol à fine résolution) et la photographie aérienne ont été utilisées à cette fin. Deux types d'image satellitaire, selon leurs disponibilités, ont été utilisés. La figure de droite présente le ratio d'englacement des images hivernales Landsat de 1996 à 2012.



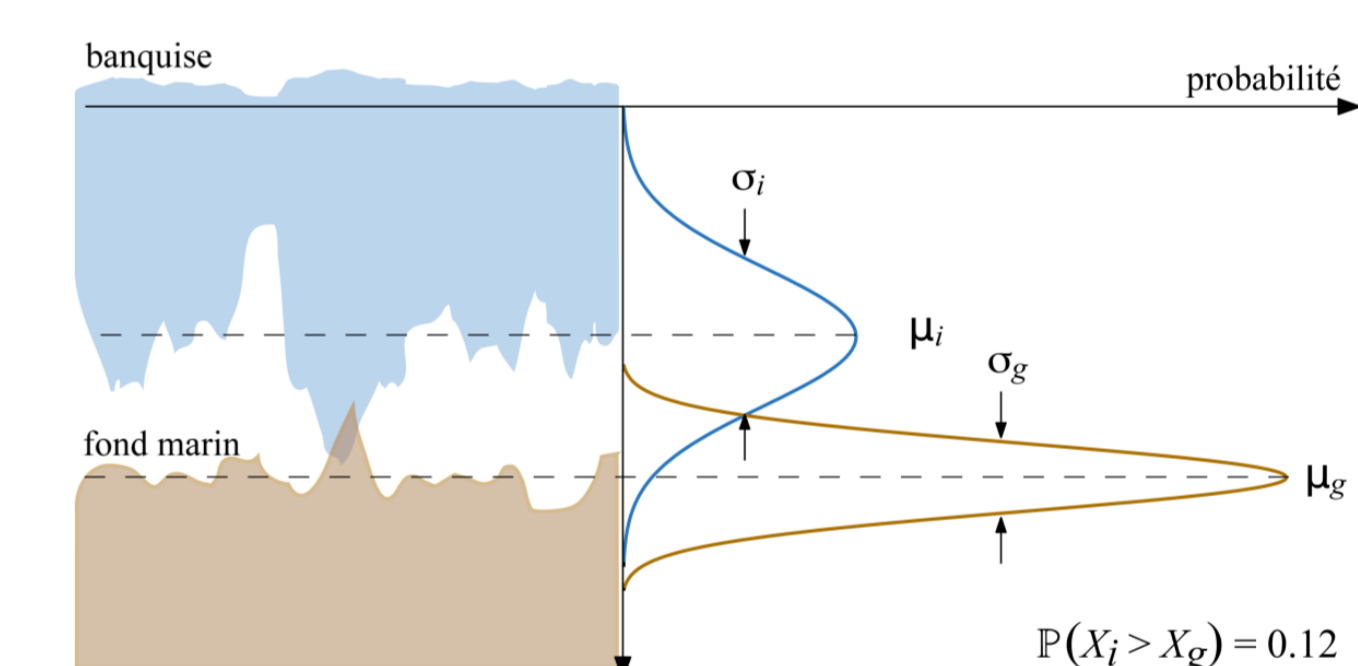
La figure de gauche présente le ratio d'englacement pour la période 1996 à 2012, pour les sites des Île-de-la-Madeleine. Les cercles rouges indiquent les sites de suivi des caméras. Cette analyse permet de faire des comparaisons synoptiques entre différentes régions.



Par la suite, une segmentation de la côte a permis de la caractériser selon son type. Nous avons pu, de cette façon, déterminer les portions de côte jugées semblables selon des observations ponctuelles dans le temps, sur une échelle de plusieurs dizaines de kilomètres dans l'espace.

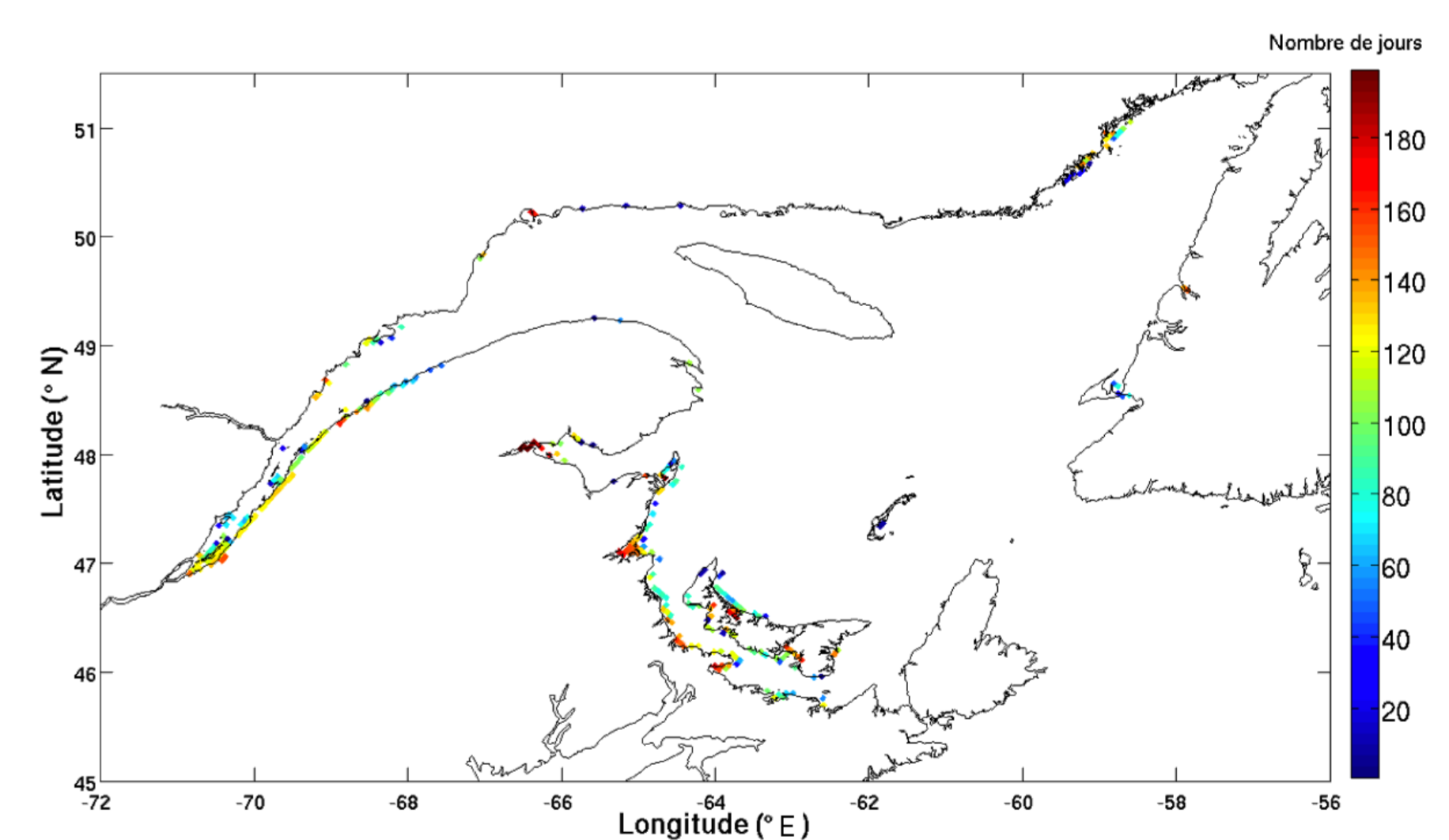
## 5. Projection déterministe du pied de glace

Le simulateur de glace utilisé (basé sur CICE) ne modélise que la glace de mer. Afin de faire des projections déterministes de la glace de rive, comme nous le faisons avec la glace de mer, nous devons modifier le comportement des glaces de mer en région côtière. Pour ce faire, nous avons évalué les distributions de glace de mer et de la bathymétrie pour déterminer la surface de contact entre elles. Quand la friction est suffisante, les glaces de mer sont maintenues en place et sont considérées comme de la glace de rive.



Les premiers résultats de cette démarche montrent que :

- Les régions de persistance des glaces modélisées pour la période 1982-2006 (figure de droite) semblent en accord avec les observations (voir section 4).
- Cette méthode tirerait avantage d'une augmentation de la résolution spatiale afin de mieux représenter la largeur de la glace de rive.



## 6. Discussion et conclusion

Dans le cadre de cette étude :

- Les observations de pied de glace et la modélisation réaliste nous ont permis de bâtir des relations empiriques robustes entre les paramètres environnementaux simulés et la présence partielle ou complète du pied de glace.
- La modélisation climatique a permis, à l'aide des relations empiriques, de prédire le climat du pied de glace de haut estran pour l'horizon 2041-2070 aux sites suivis.
- L'analyse d'imagerie satellitaire et aérienne a permis de déterminer la portée des résultats d'un site par rapport aux côtes avoisinantes.
- Nous avons fait un premier pas vers une modélisation déterministe de la glace de rive.

De façon générale, pour l'horizon 2041-2070, les périodes d'englacement du pied de glace de haut estran seront plus courtes de 27 à 45 jours et, de plus, les périodes d'englacement partielles seront allongées de 7 à 15 jours. Donc, non seulement la période pour laquelle le pied de glace offre une protection contre l'érosion sera plus courte, mais celle pour laquelle le pied de glace partiel peut favoriser l'érosion des berges sera plus longue.

Financé par le ministère des Transports du Québec dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec, Action 23C - volet érosion côtière.

Remerciement: Nous remercions James Caveen pour son support informatique.