

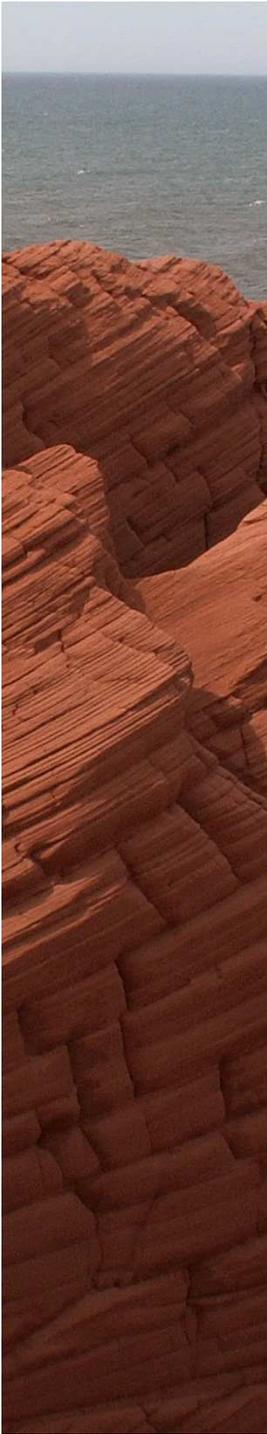


# Les risques côtiers d'érosion et de submersion: la recherche en support à la gestion

*Chaire de recherche en  
géoscience côtière*

Christian Fraser  
Pascal Bernatchez  
Université du Québec à Rimouski





# Plan de présentation

**1) Principaux enjeux associés aux aléas côtiers**

**2) Bilan de l'érosion et de la submersion**

**3) Causes de l'érosion côtière**

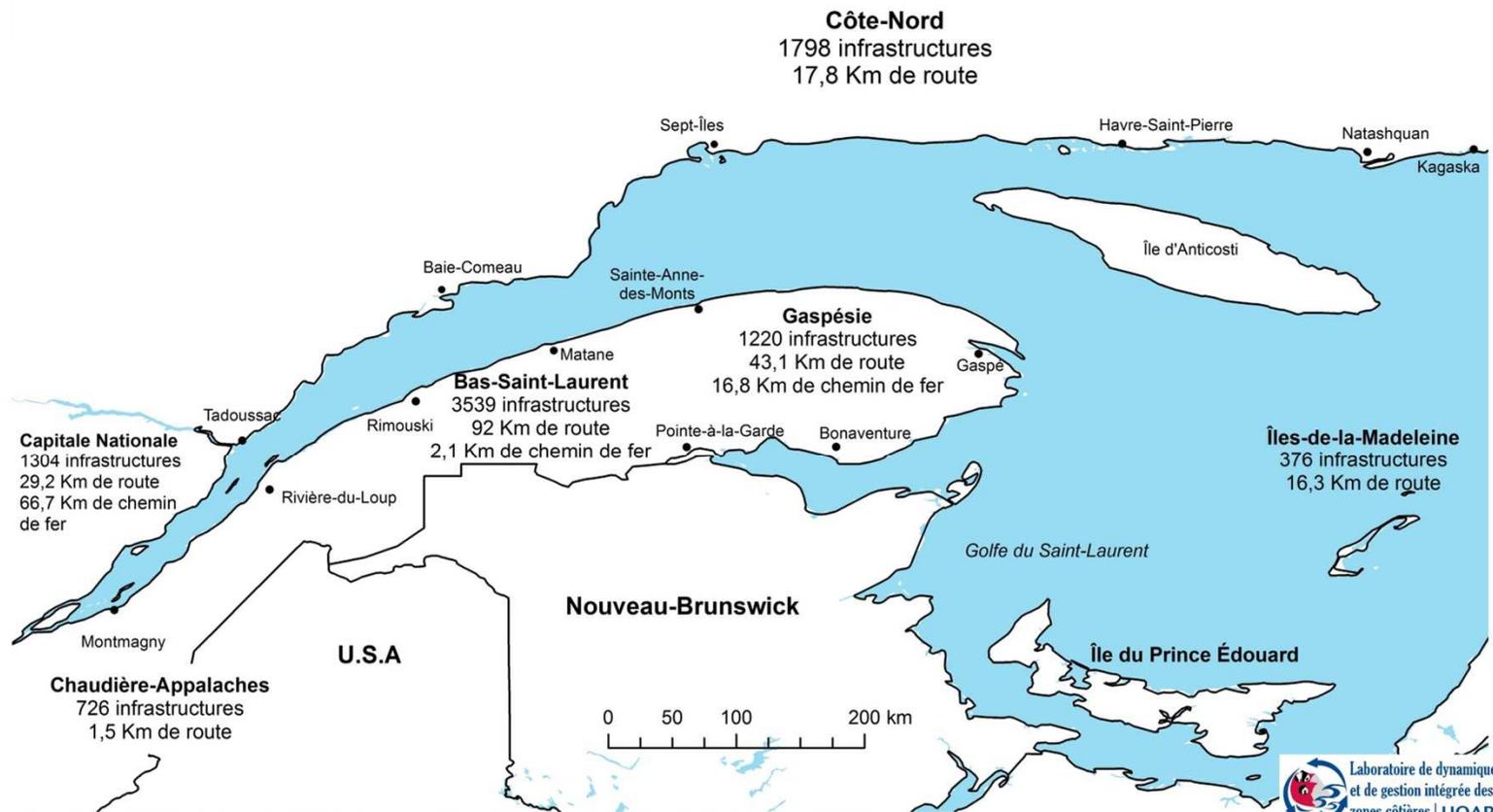
**4) Travaux actuels du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et de la Chaire de recherche en géoscience côtière**

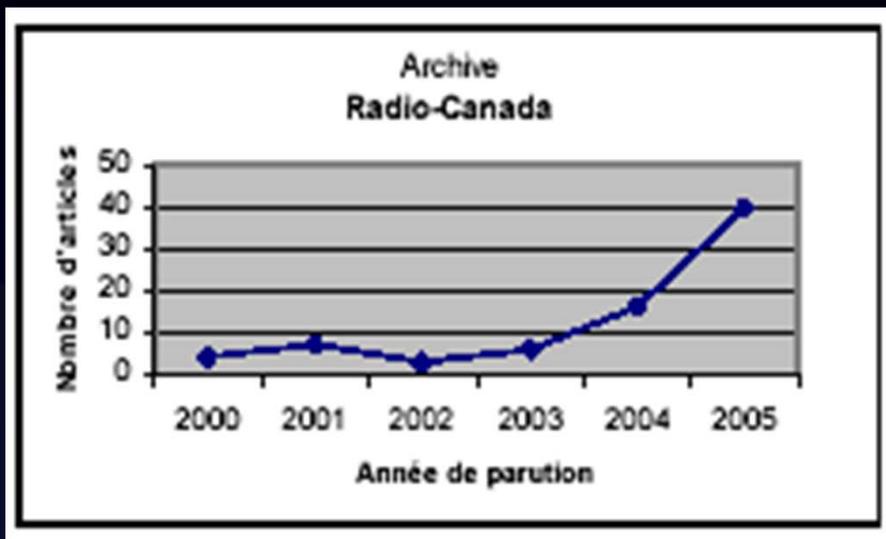
# Les zones problématiques d'érosion de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent



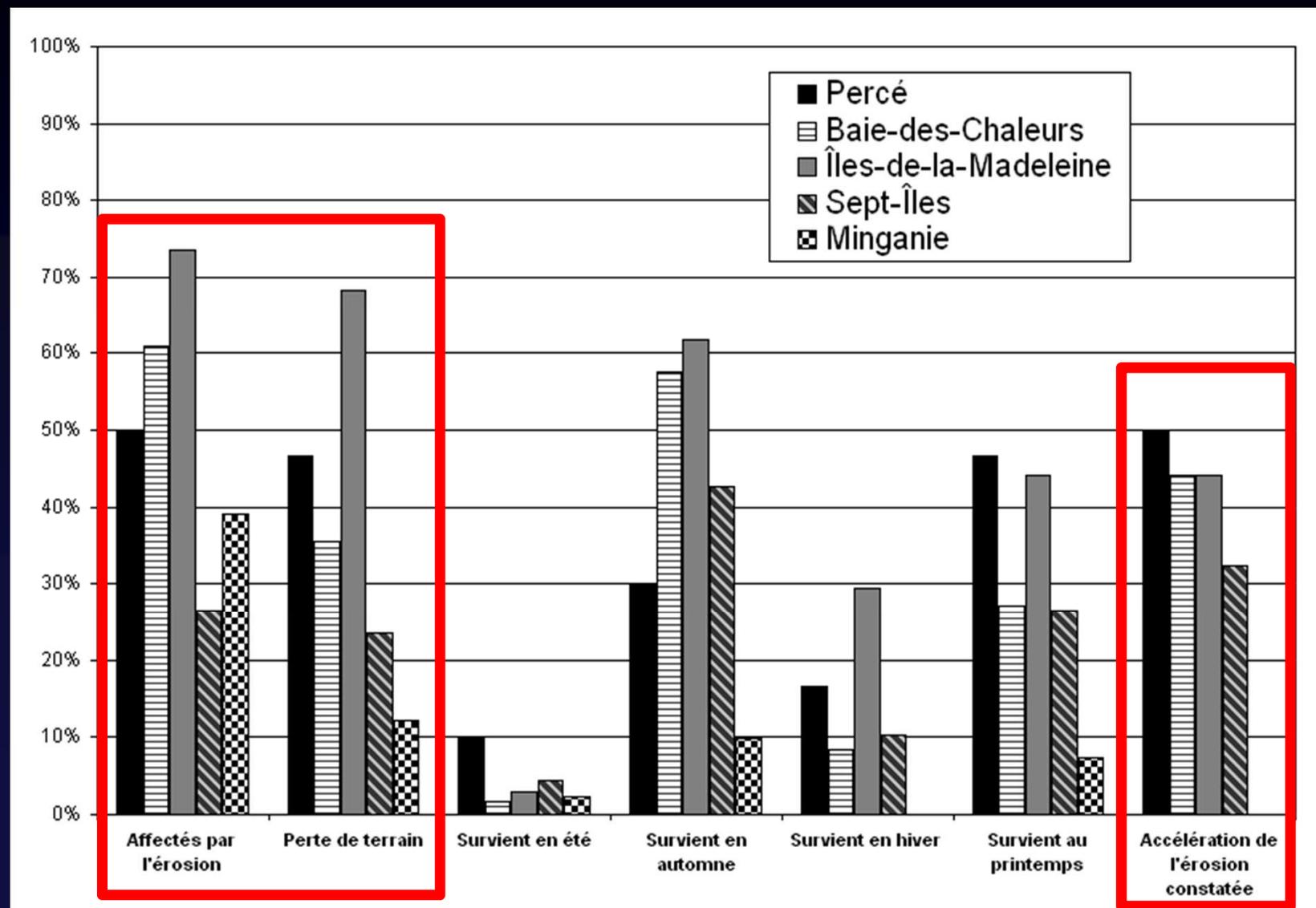
# Réseau de suivi des infrastructures potentiellement vulnérables (2012)

**Cadre bâti : 8 963 bâtiments**  
**Tronçons routiers : 200 km**  
**Tronçons ferroviaires : 85,6 km**





## Observations générales des répondants sur l'érosion côtière

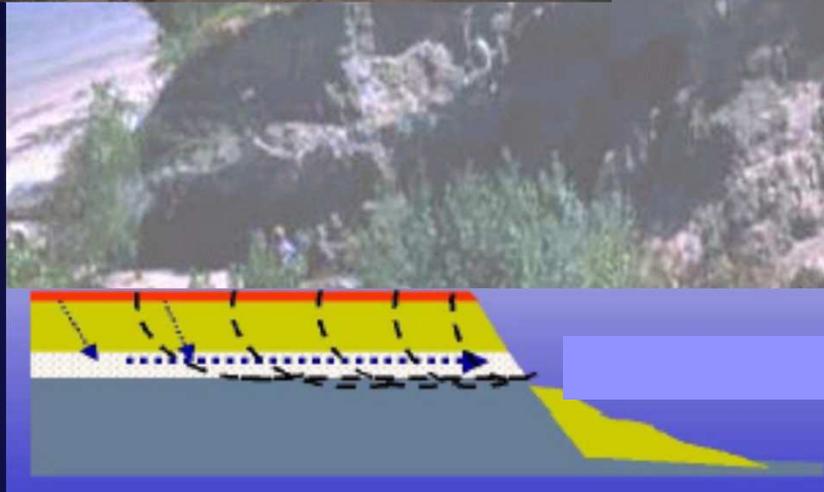


# 1) Les enjeux socio-économiques : Cadre bâti, géorisques côtiers et qualité de vie

2006



Avril 1983 : fortes pluies



Pointe-Lebel, Côte-Nord

# 1) Les enjeux socio-économiques : Cadre bâti, géorisques côtiers et qualité de vie

Zone à risque de glissements de terrain



Baie des Chaleurs, Gaspésie



Résidences à risque à Percé  
Automne 2005 (I-PER-11)

## Bonaventure, Gaspésie



## Chandler, Gaspésie



# 1) Les enjeux socio-économiques : Cadre bâti, géorisques côtiers et qualité de vie

Sept-Îles, Côte-Nord



Sept-Îles, Côte-Nord

# 1) Les enjeux socio-économiques : Cadre bâti, géorisques côtiers et qualité de vie



**Résidences à Sainte-Luce**



**Sainte-Flavie**



**Tempête automne 2005**



**Résidences en zone de submersion  
à Maria (Pointe-verte)**

## Résidences en zone de submersion aux Îles-de-la-Madeleine



Submersion lors tempête de  
décembre 2010, baie des Chaleurs



# 1) Les enjeux socio-économiques : Maintien des infrastructures nationales de transport



**Enrochement sur plusieurs  
kilomètres à Bonaventure**



**Muret sur plusieurs  
kilomètres à Maria**





**Route 199**  
**Îles-de-la-Madeleine**



**Réseau routier menacé sur la Côte-Nord**

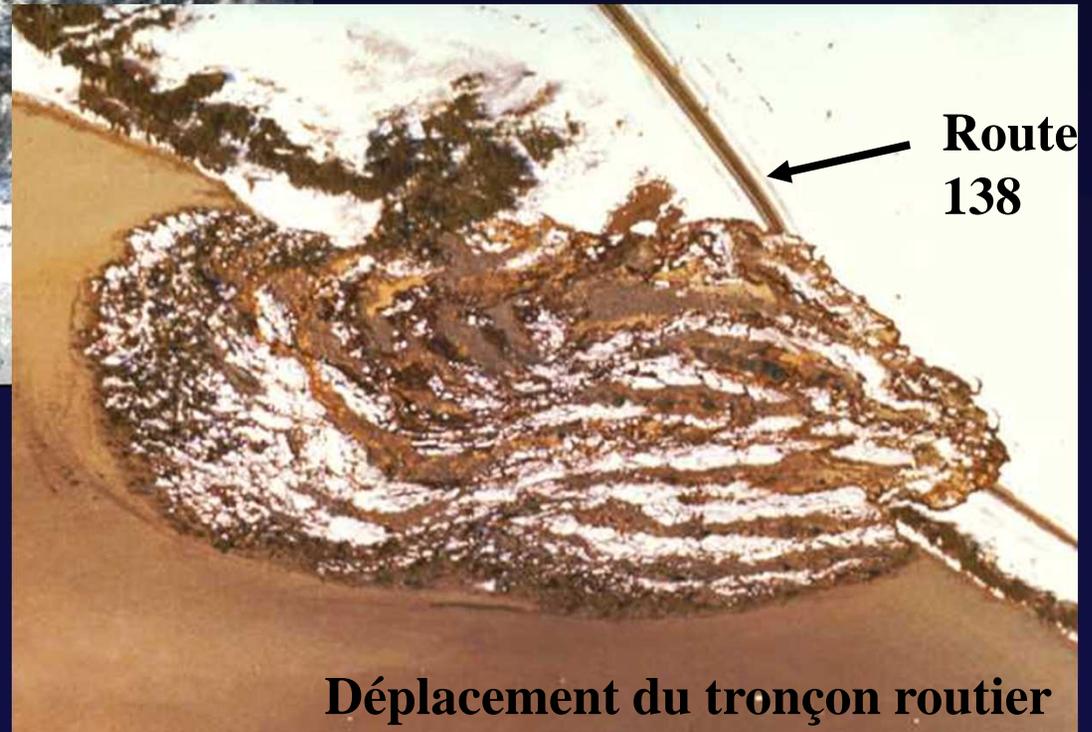
# 1) Les enjeux socio-économiques : Maintien des infrastructures nationales de transport



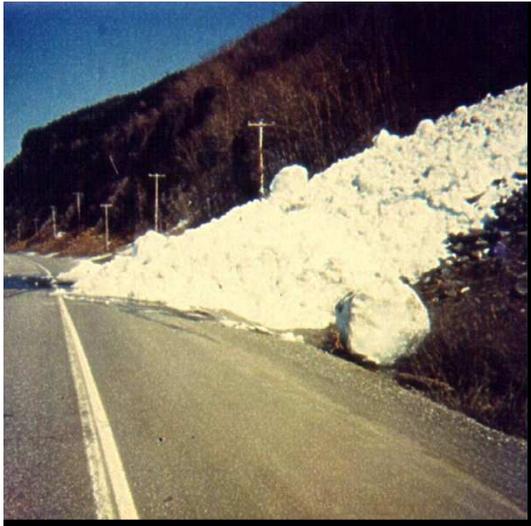
Les Escoumins,  
Côte-Nord



Havre Saint-Pierre,  
Côte-Nord



Déplacement du tronçon routier



# Avalanches et chutes de blocs rocheux et de glace

## Accidents routiers



Gracieuseté de Bernard Hétu, UQAR

# 1) Les enjeux socio-économiques : Maintien des routes municipales



Pointe-au-Père,  
Bas-Saint-Laurent



Rivière Ouille  
Bas-Saint-Laurent

# 1) Les enjeux socio-économiques : Maintien des infrastructures ferroviaires

Barachois



Carleton-sur-Mer



Réseau routier et ferroviaire menacés  
par des mouvements de versants

Voie ferrée



Charlevoix

# 1) Les enjeux socio-économiques : Infrastructures portuaires

Cap Pelé, Nouveau-Brunswick



Old Harry, Îles-de-la-Madeleine



# 1) Les enjeux socio-économiques : Développement touristique = hébergement, restauration

Bonaventure



Percé



Matane



Île d'Orléans



# 1) Les enjeux socio-économiques : Développement touristique = Hébergement, restauration



Accès au camping municipal



Route municipale menacée par l'érosion et la submersion  
à Carleton, automne 2005 (I-CAR-10)

Route du camping menacée par l'érosion et  
la submersion, Carleton-sur-Mer

# 1) Les enjeux socio-économiques : Développement touristique = Promenades

Sainte-Luce (automne 2005)



Percé

Après la tempête

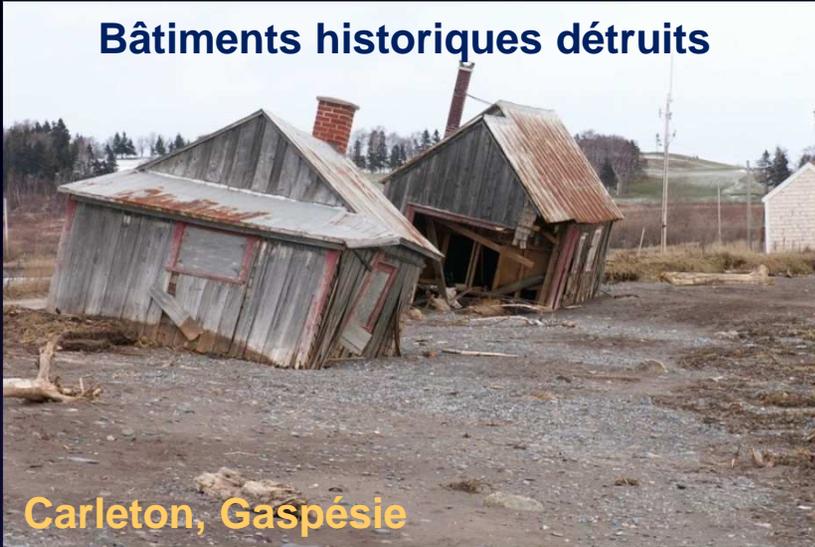


Saint-Omer



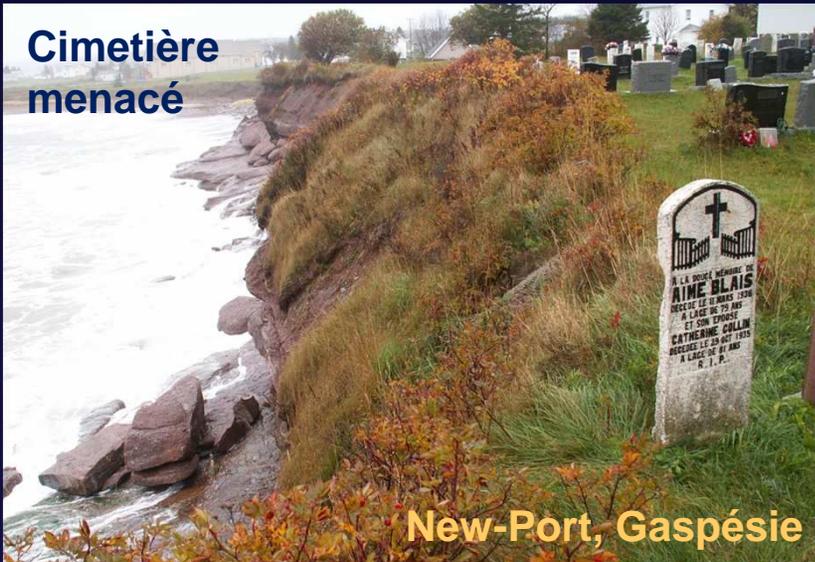
# Les enjeux socio-économiques : Culture et patrimoine

Bâtiments historiques détruits

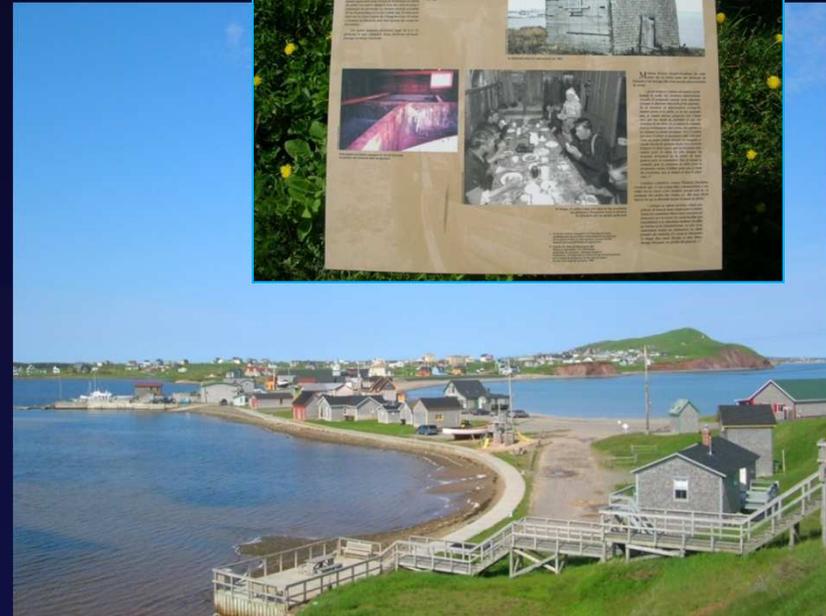


Carleton, Gaspésie

Cimetière  
menacé



New-Port, Gaspésie



La Grave, Îles-de-la-Madeleine

**Saint-Siméon, Baie des Chaleurs**



**Cordon de poussées glacielles**



**Sept-Îles**



**Déferlement de blocs de glace**

# Cordon de poussées glacielles au Manitoba en mai 2013



(JOHN WOODS / WINNIPEG FREE PRESS)



(PHIL HOSSACK / WINNIPEG FREE PRESS)

**27 maisons  
endommagées  
ou détruites**

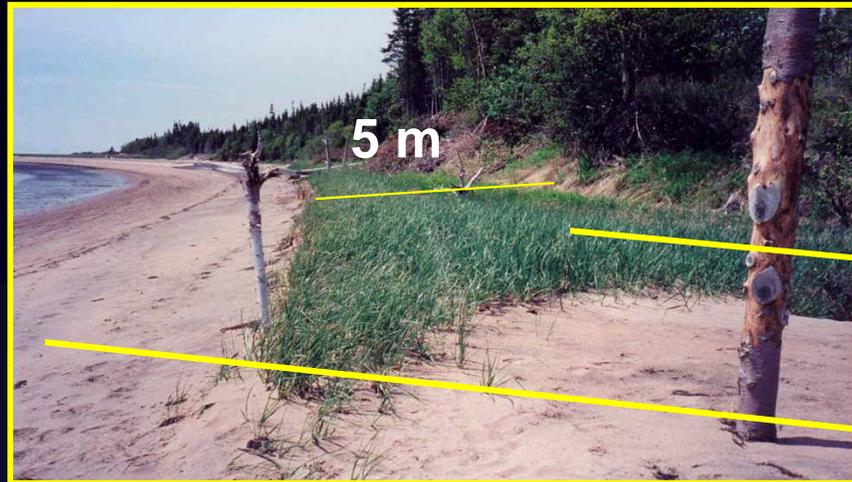
## 2) Les enjeux écologiques : Pertes ou modification des habitats côtiers

Île aux Grues



Érosion des marais = perte d'habitat

# Impact d'une tempête



## a) Avant la tempête

Végétation sur le haut de plage

Plage sablonneuse



## b) Après la tempête

Érosion complète du haut de plage et exposition de la falaise

Érosion complète du sable sur la plage



Secteur de pointe aux anglais, Côte-Nord

**Modification du substrat, on passe d'une plage sableuse à une plage de blocs en raison du déficit sédimentaire**

## **Ce déficit sédimentaire affecte certains habitats comme les myes**

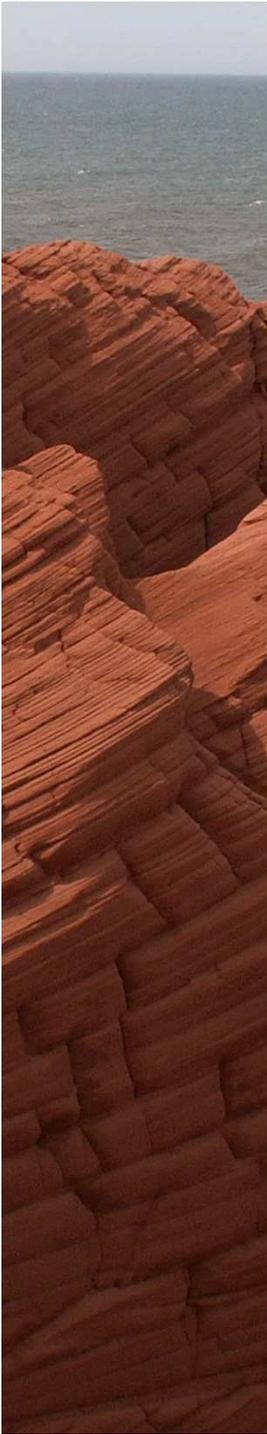


**Impact écologique**

**Impact socio-économique**

**Impact sur les mœurs  
de la communauté  
régionale, car c'est  
une activité culturelle  
importante**





# Plan de présentation

**1) Principaux enjeux associés aux aléas côtiers**

**2) Bilan de l'érosion et de la submersion**

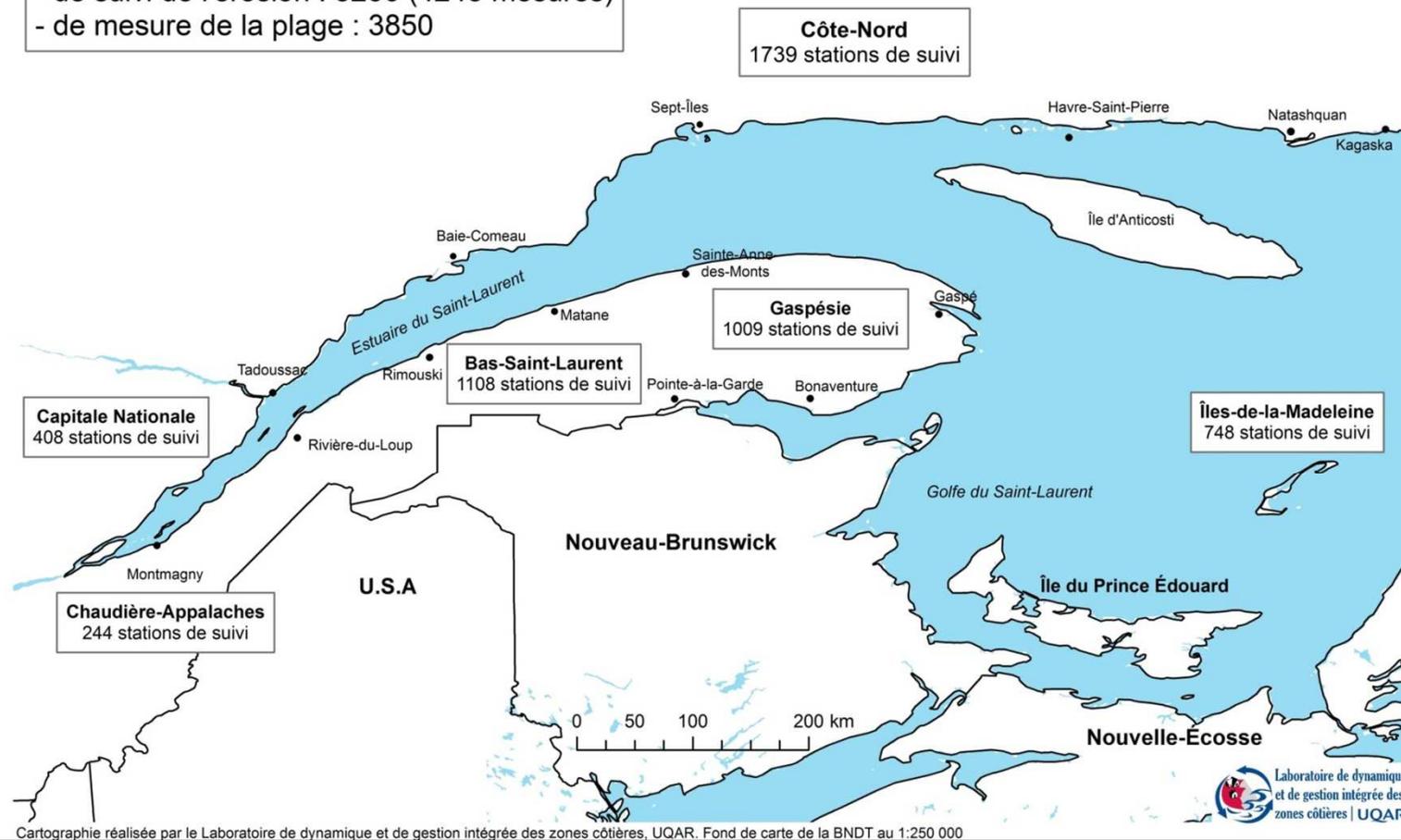
**3) Causes de l'érosion côtière**

**4) Travaux actuels du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et de la Chaire de recherche en géoscience côtière**

# Réseau de suivi de l'érosion côtière du Québec maritime (2000-2012)



Nombre de stations effectives en 2012  
- de suivi de l'érosion : 5256 (4248 mesures)  
- de mesure de la plage : 3850

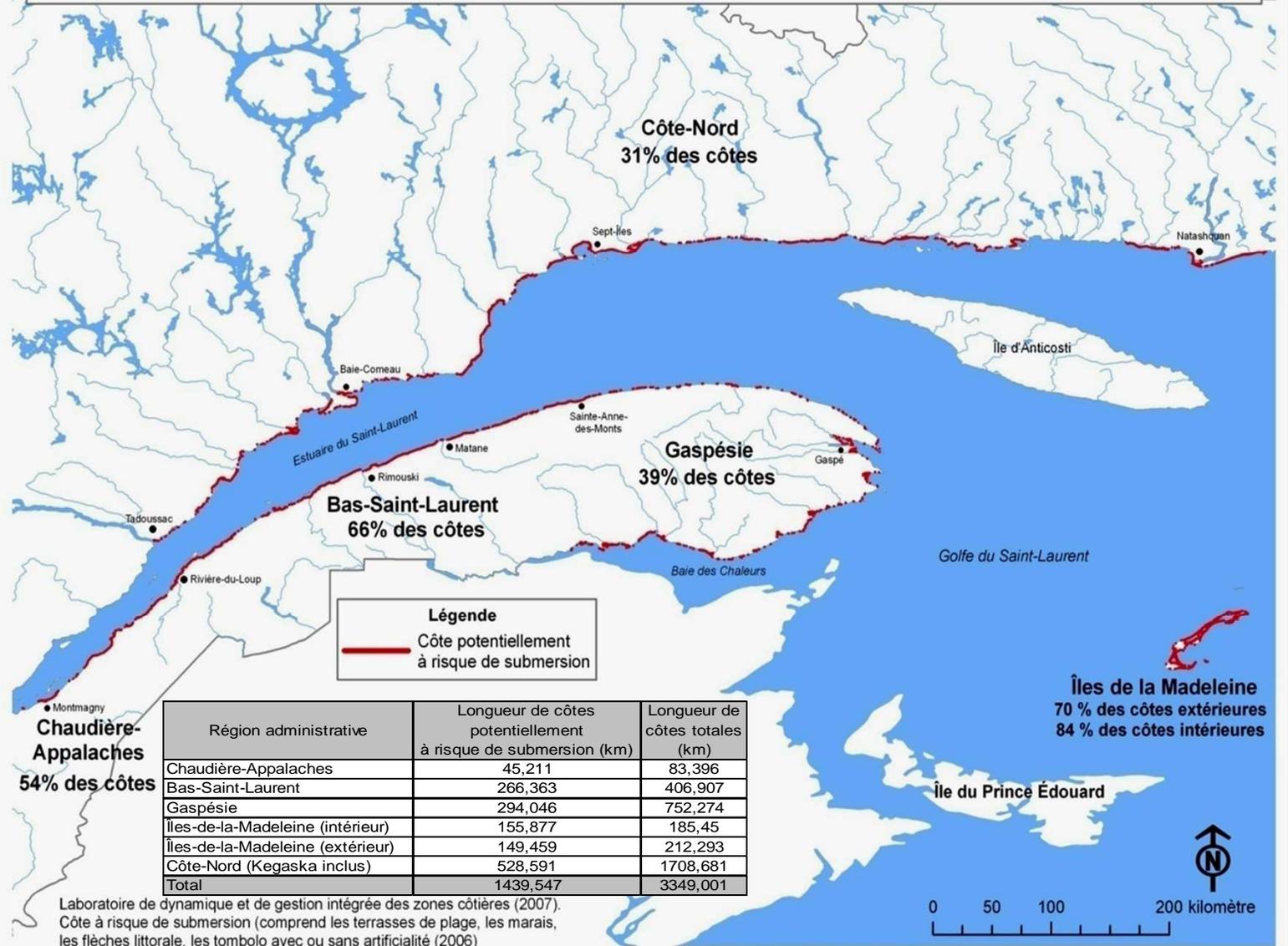


**Entre 2000 et 2012, le taux de déplacement moyen pour l'ensemble des stations de suivi du Québec Maritime est de -0,58 m/an (24919 mesures)**



## 43 % du littoral du Québec maritime est potentiellement à risque de submersion

Localisation des zones potentiellement à risque de submersion et pourcentage des côtes submersibles par région administrative au Québec

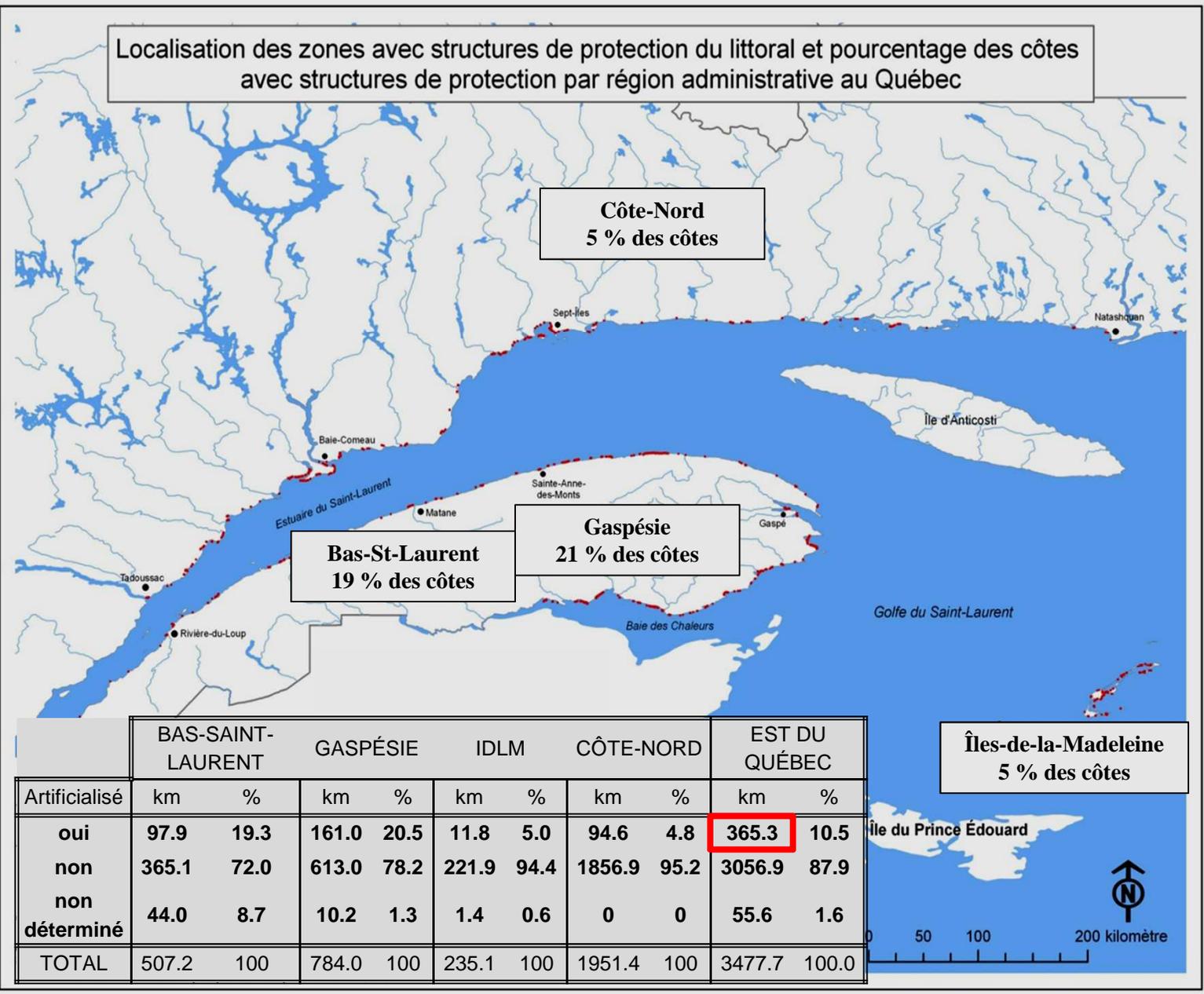


Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (2007).  
Côte à risque de submersion (comprend les terrasses de plage, les marais, les flèches littorales, les tombolo avec ou sans artificialité) (2006)

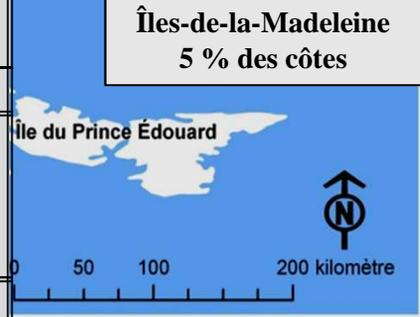
# Ouvrages de protection côtière (2010)



Localisation des zones avec structures de protection du littoral et pourcentage des côtes avec structures de protection par région administrative au Québec



	BAS-SAINT-LAURENT		GASPÉSIE		IDL M		CÔTE-NORD		EST DU QUÉBEC	
	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%
Artificialisé										
oui	97.9	19.3	161.0	20.5	11.8	5.0	94.6	4.8	365.3	10.5
non	365.1	72.0	613.0	78.2	221.9	94.4	1856.9	95.2	3056.9	87.9
non déterminé	44.0	8.7	10.2	1.3	1.4	0.6	0	0	55.6	1.6
TOTAL	507.2	100	784.0	100	235.1	100	1951.4	100	3477.7	100.0

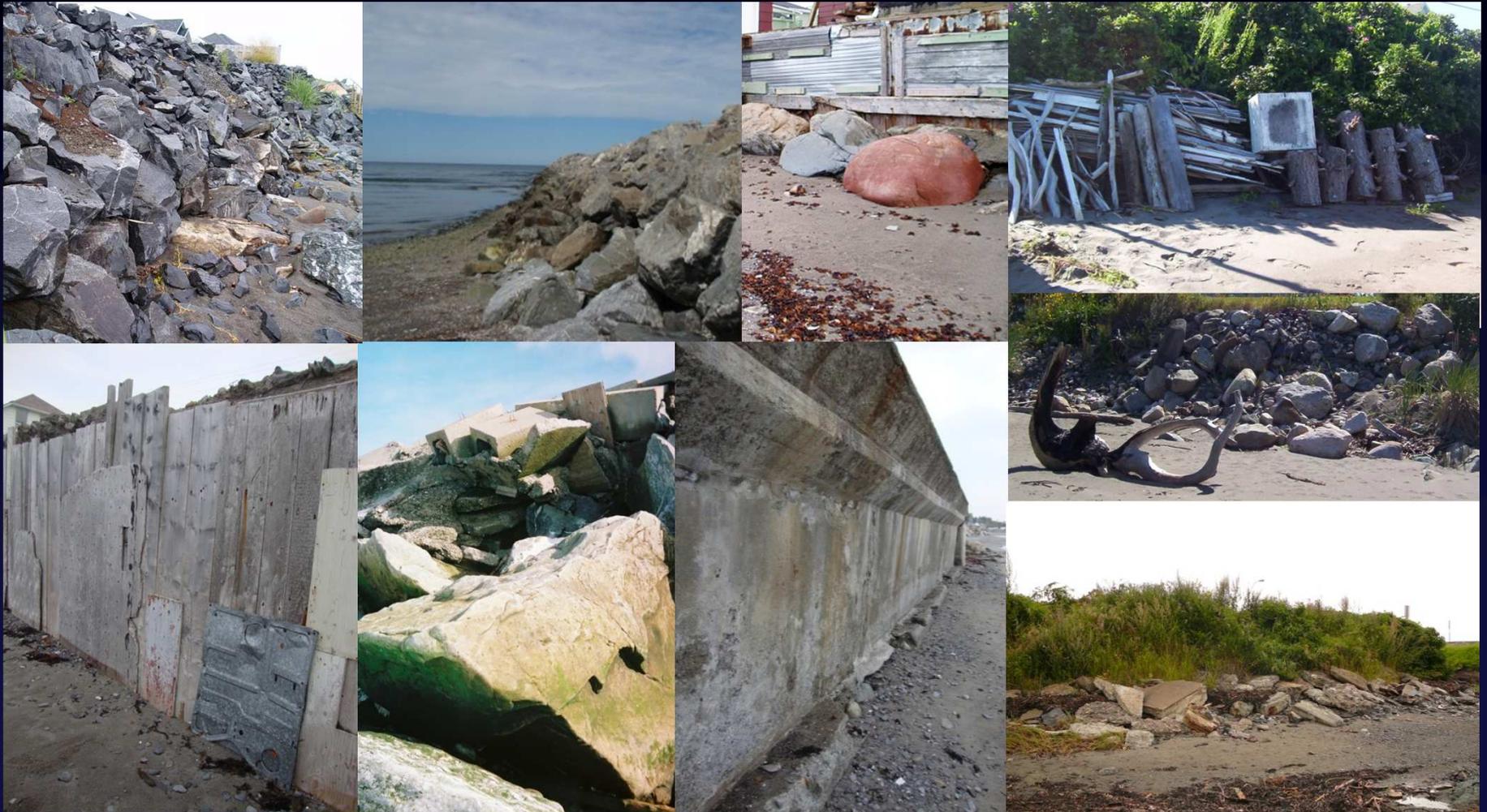


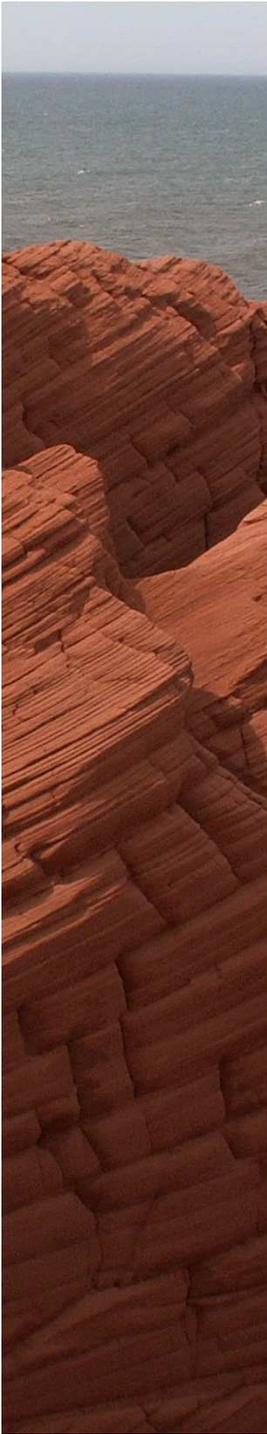
# Artificialité



Côtes naturelles vs côtes artificielles	Sainte-Luce (%)	Sainte-Flavie (%)	Grand-Métis (%)	Métis-sur-Mer (%)	MRC Mitis (m)	MRC Mitis (%)
Côtes <b>sans</b> infrastructure de protection	34	48	71	87	33073	62
Côtes <b>avec</b> infratructure de protection	66	52	29	13	20095	38

## Des techniques de stabilisation souvent non adaptées aux processus





# Plan de présentation

**1) Principaux enjeux associés aux aléas côtiers**

**2) Bilan de l'érosion et de la submersion**

**3) Causes de l'érosion côtière**

**4) Travaux actuels du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et de la Chaire de recherche en géoscience côtière**

# Une grande diversité de types de côte



Terrasse de plage



Tombolo



Falaise rocheuse à sommet meuble



Falaise meuble (sableuse)



Marais maritime



Falaise rocheuse



Falaise meuble (sable /silt-argile)



Flèche littorale



Côte rocheuse sans falaise

# Une grande diversité de types de processus

Submersion



Sapement par les vagues



Glissement de terrain



Glissement en plan

Poussée glacielle



Sapement par les vagues



Submersion/surcote



Poussée glacielle



Processus cryogéniques



Coulée boueuse liée au dégel



Coulée argileuse



Glissement de terrain



Glissement en plan



Ravinement/suffosion



Effondrement-écroulement



Éboulement-éboulis



Avancée dunaire

Ravinement



Suffosion

Processus cryogéniques



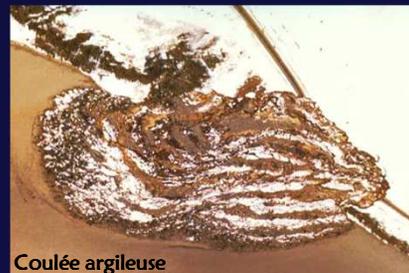
Avancée dunaire



Effondrement



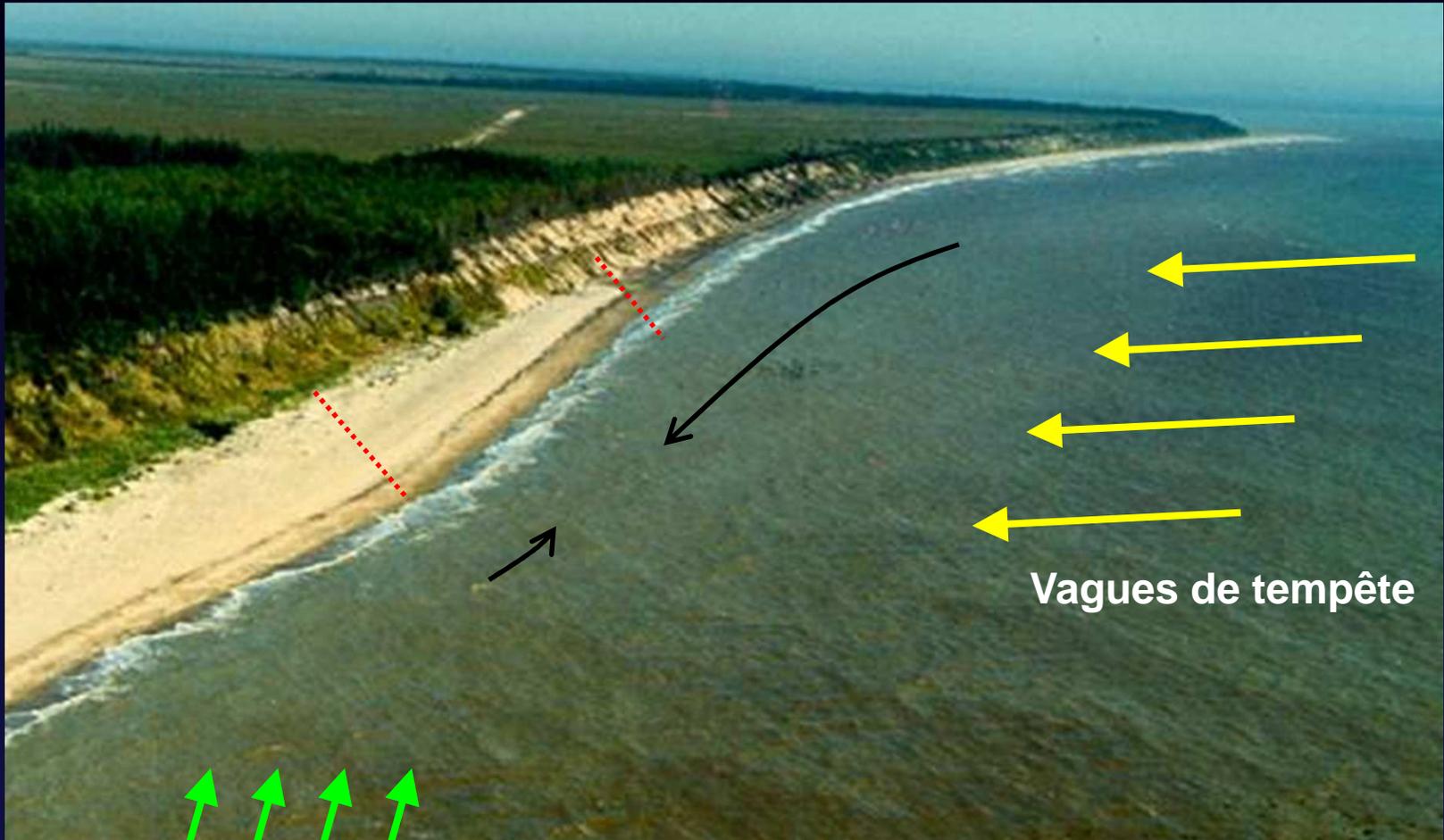
Coulée boueuse



Coulée argileuse

# Dynamique hydrosédimentaire

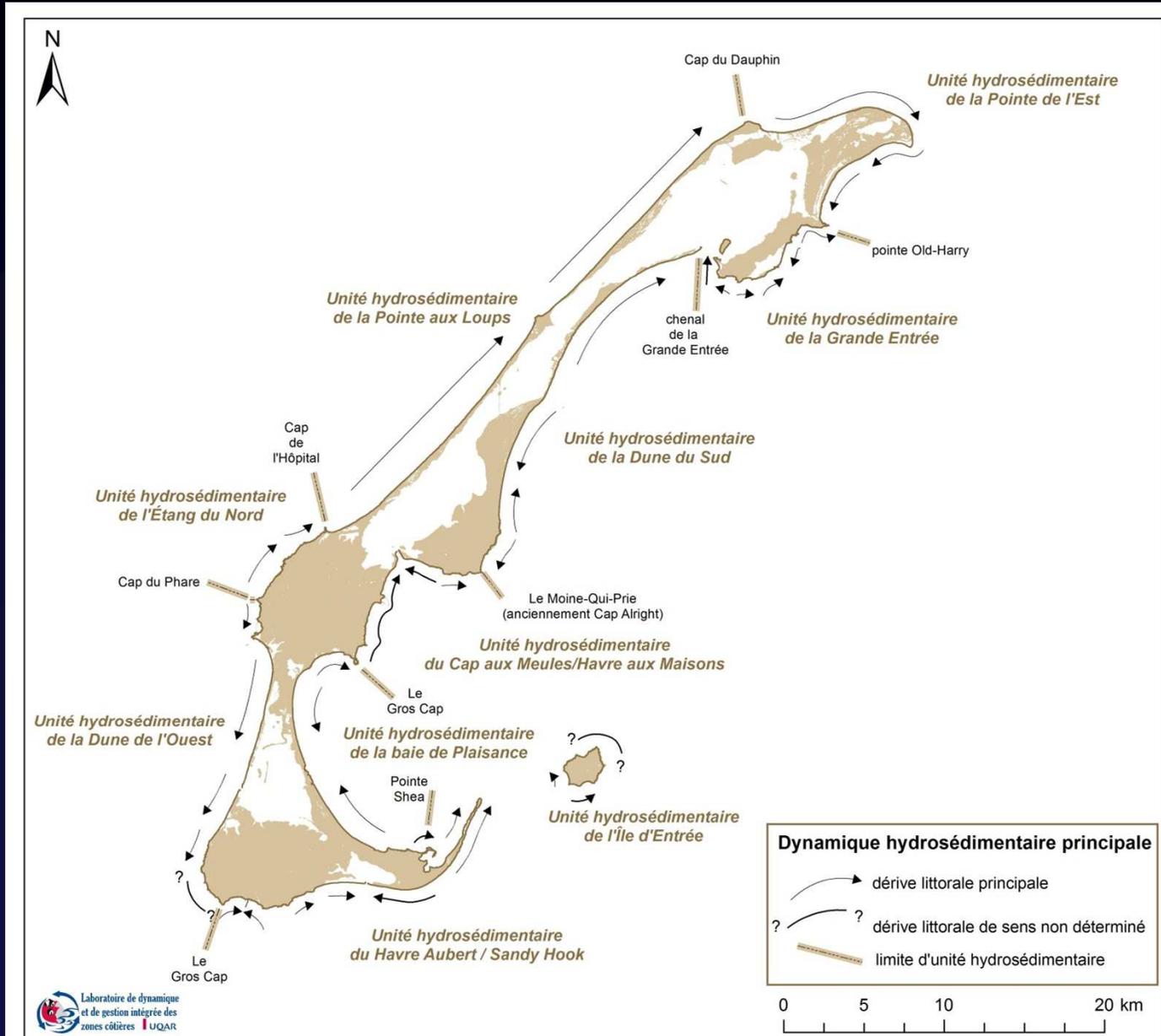
## Unités et cellules hydrosédimentaires



Vagues de beau temps

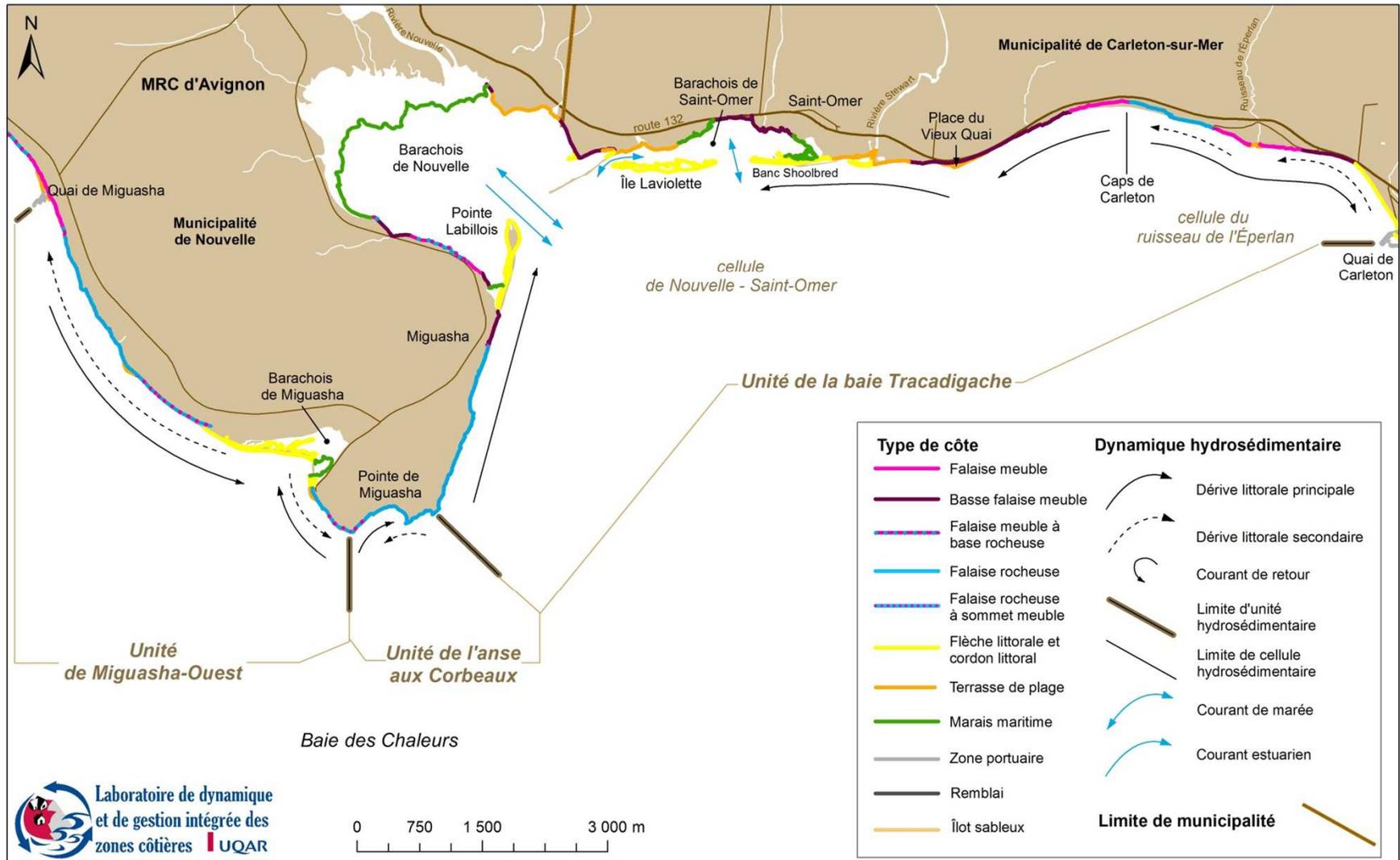
Vagues de tempête

# Dynamique hydrosédimentaire



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, octobre 2011, fond de carte : BDTQ 1:20 000

# Fonctionnement d'un système côtier



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. Réalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, juillet 2012.

# Causes de l'érosion côtière

- 1) Hausse du niveau marin relatif/hausse globale des océans - tempêtes
- 2) Diminution de la glace littorale
- 3) Hausse des cycles gel-dégel/redoux hivernaux et pluies hivernales
- 4) Les activités et interventions humaines et le déficit sédimentaire des plages



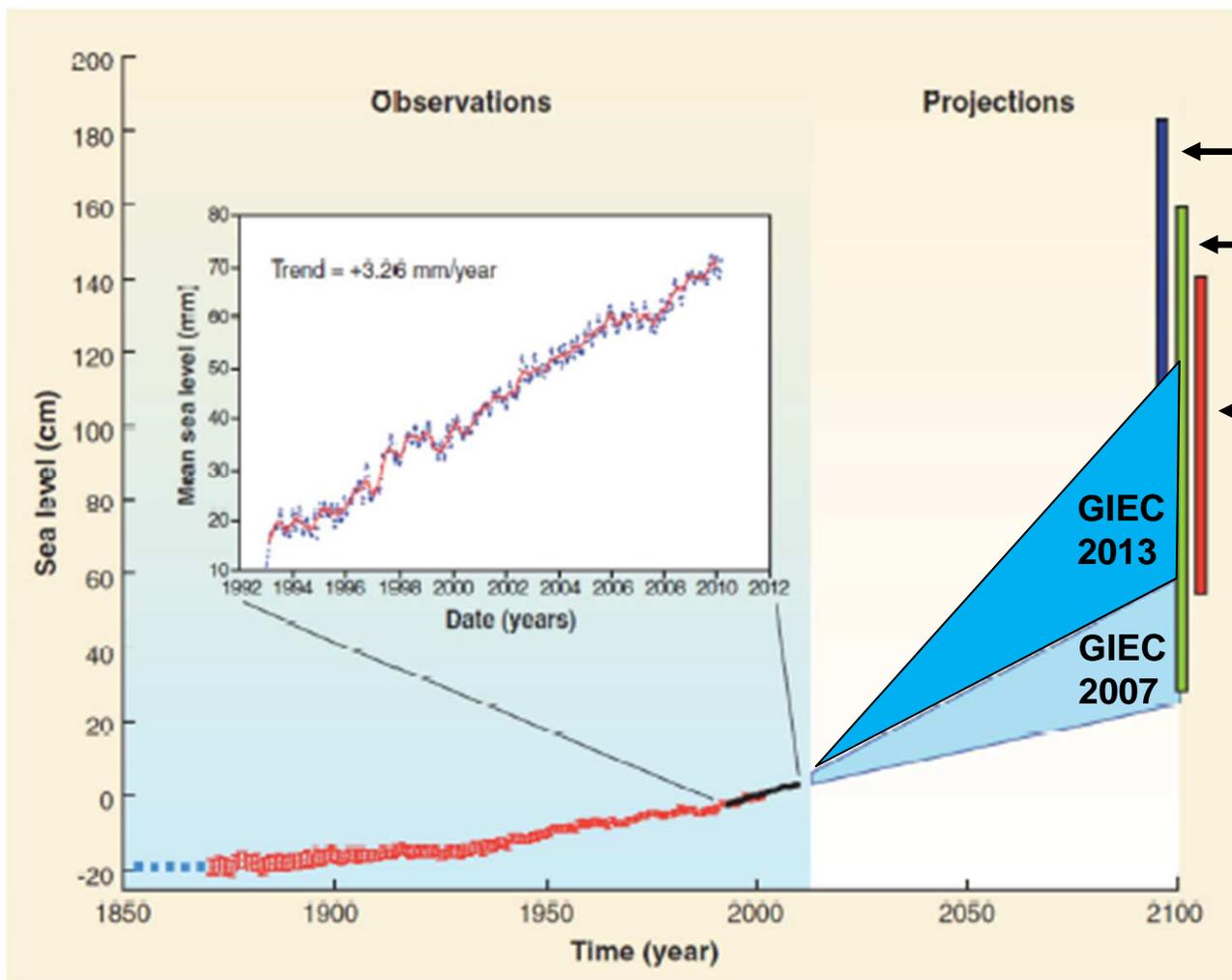
CLIMAT

## Hausse globale des océans/ hausse du niveau marin relatif



*Photo : Gracieuseté de Parcs Canada, Louisbourg, Nouvelle-Écosse*

# Observation historique et projections de hausse du niveau de la mer



Vermeer, S. Rahmstorf, 2009

Grinsted et al., 2009

Rahmstorf, 2007

GIEC 2013

GIEC 2007

Modifié de : Nicholls et Cazenave (2010)

# Tendance de la vitesse de la hausse du niveau de la mer



Figure 1. Location of tide stations on the Atlantic coast of North America.

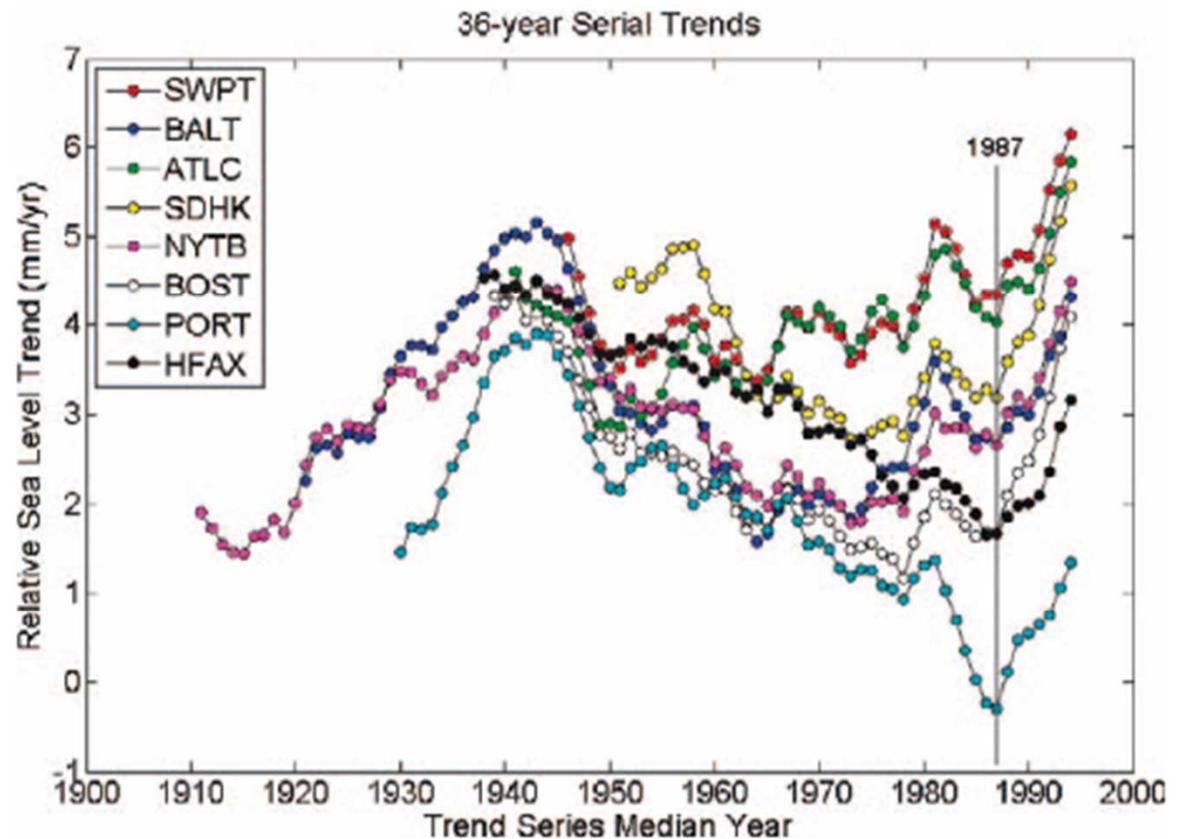
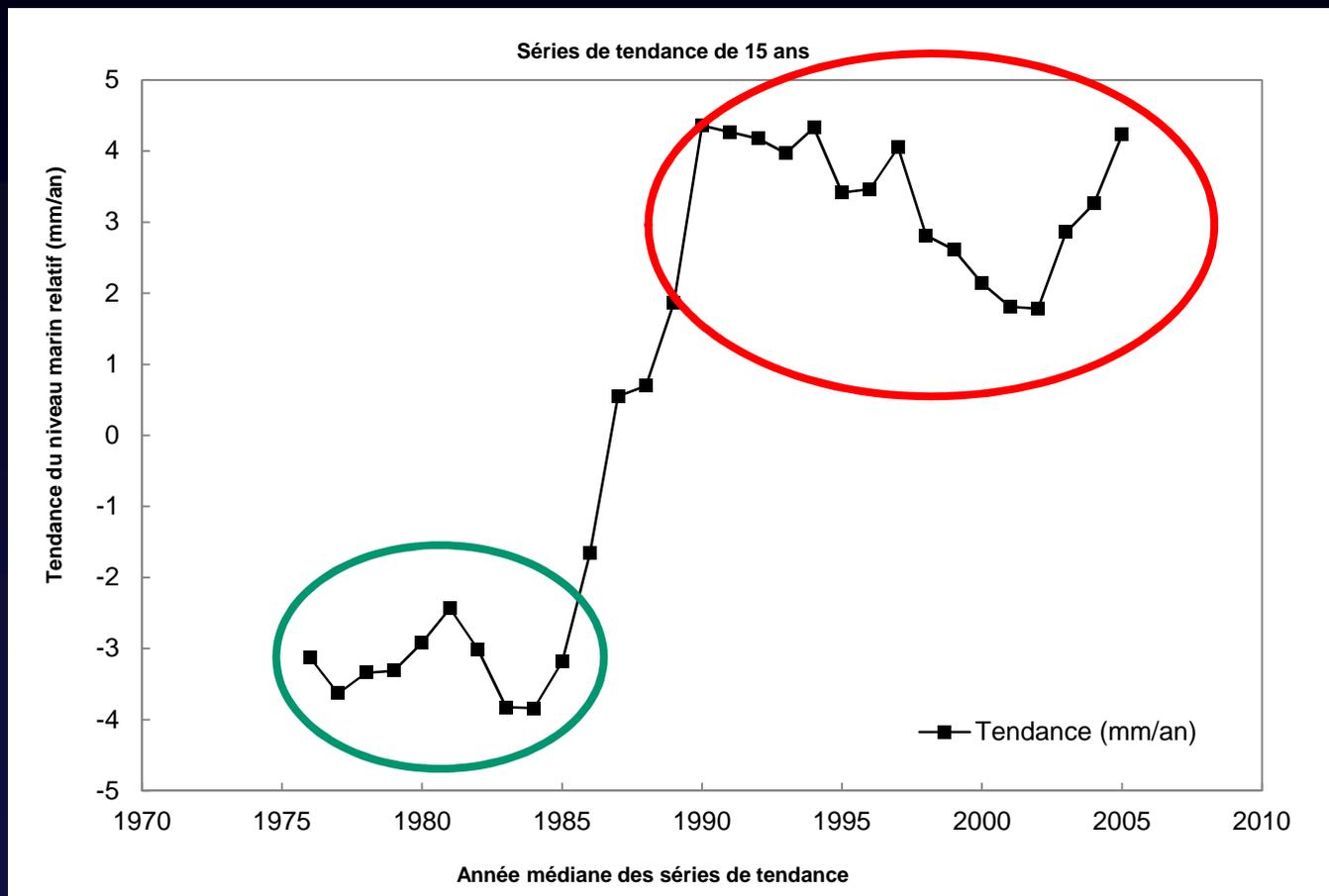


Figure 2. Serial trends at tide stations, NE group ( $n = 36$  y).

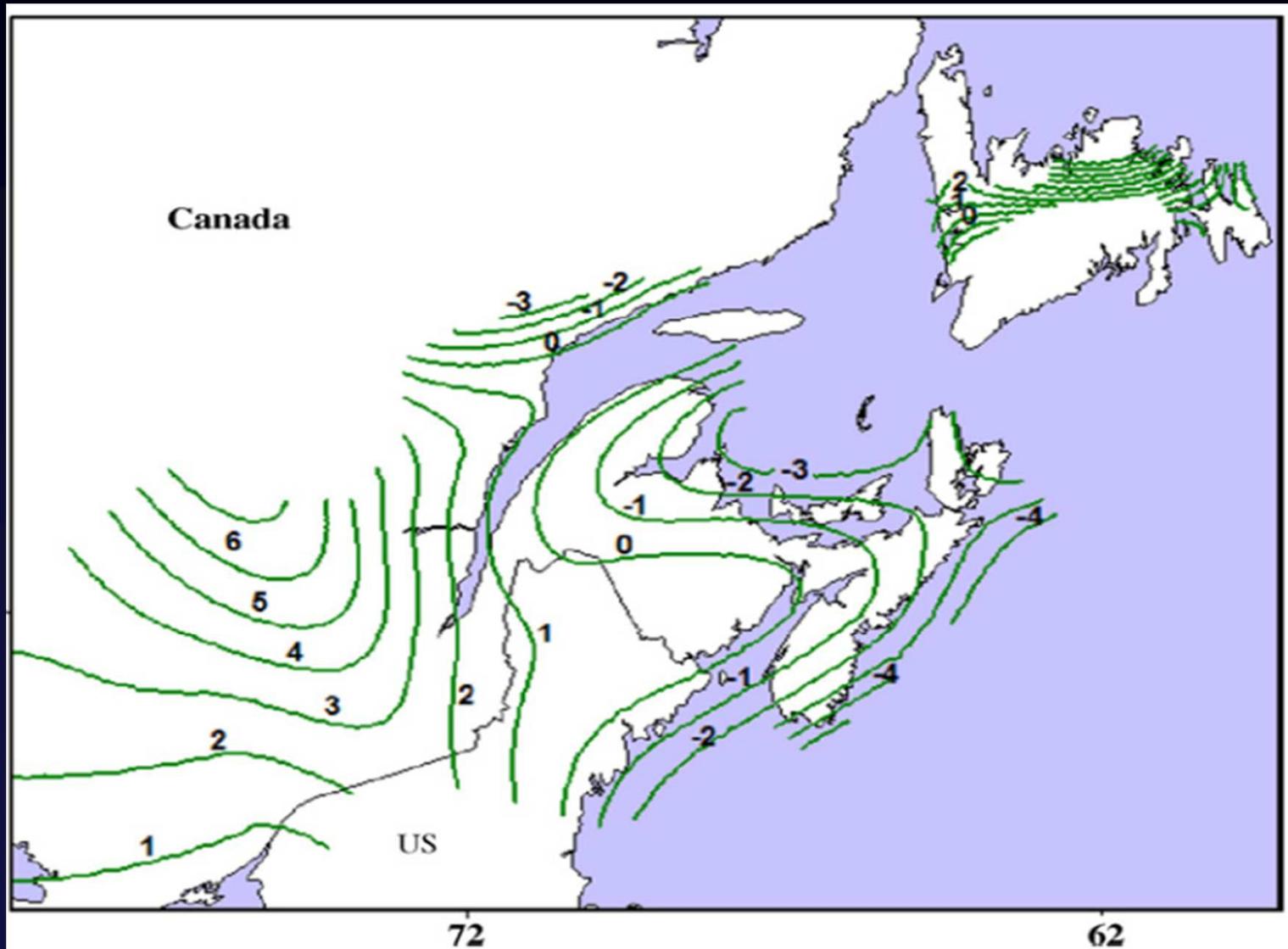
# Tendance du niveau marin relatif

## Station de Rivière-au-Renard, Nord de la Gaspésie



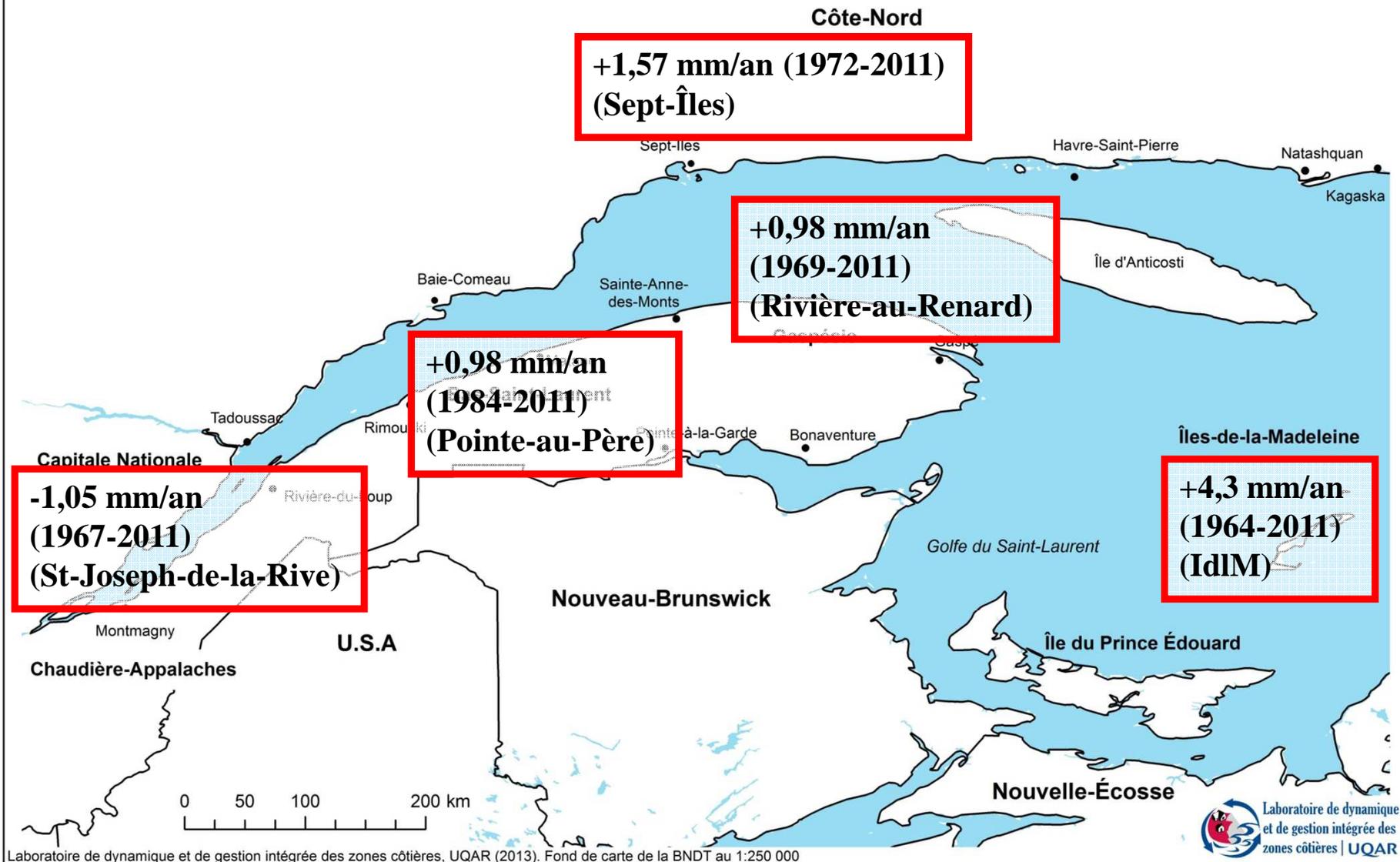
**Séries de tendances calculées sur 15 ans.**  
**Permet d'identifier les périodes d'accélération de la tendance et de constater qu'après 1987 (année médiane) il y a une transition vers des tendances positives.**

## Variation verticale de la croûte terrestre

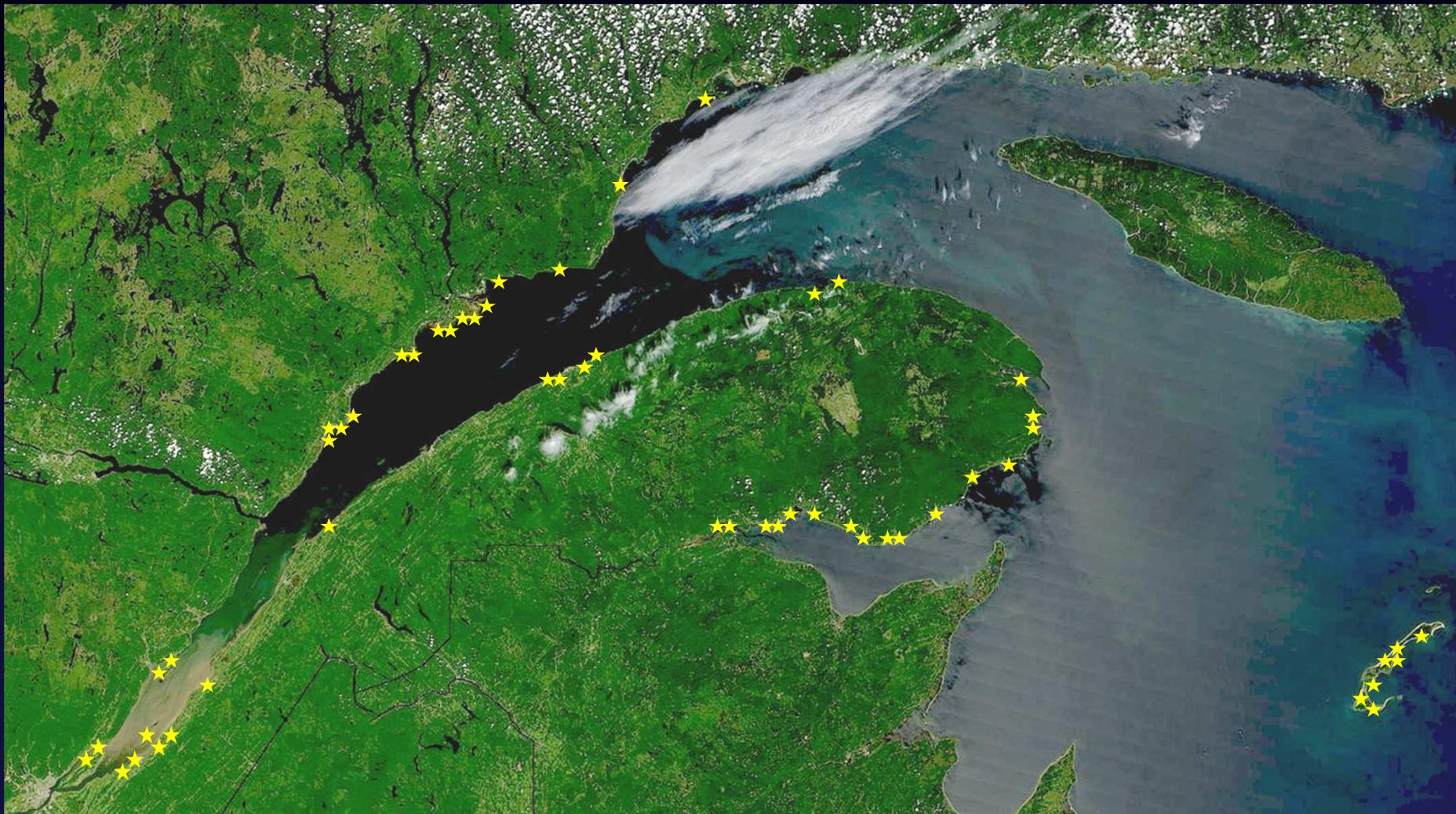


Koohzare *et al.* (2008)

# Tendances historiques des niveaux d'eau mesurés



# Signes de submersion dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent



# Le littoral migre à l'intérieur des terres

Marais des Îlets-Jérémie  
Côte-Nord



## **Saint-Omer, Baie des Chaleurs**



**Ancienne tourbière continentale**



**Pointe-aux-Loups – Grosse-île,  
Îles-de-la-Madeleine**



# Analyse de la hausse du niveau marin



**Baie des Chaleurs**



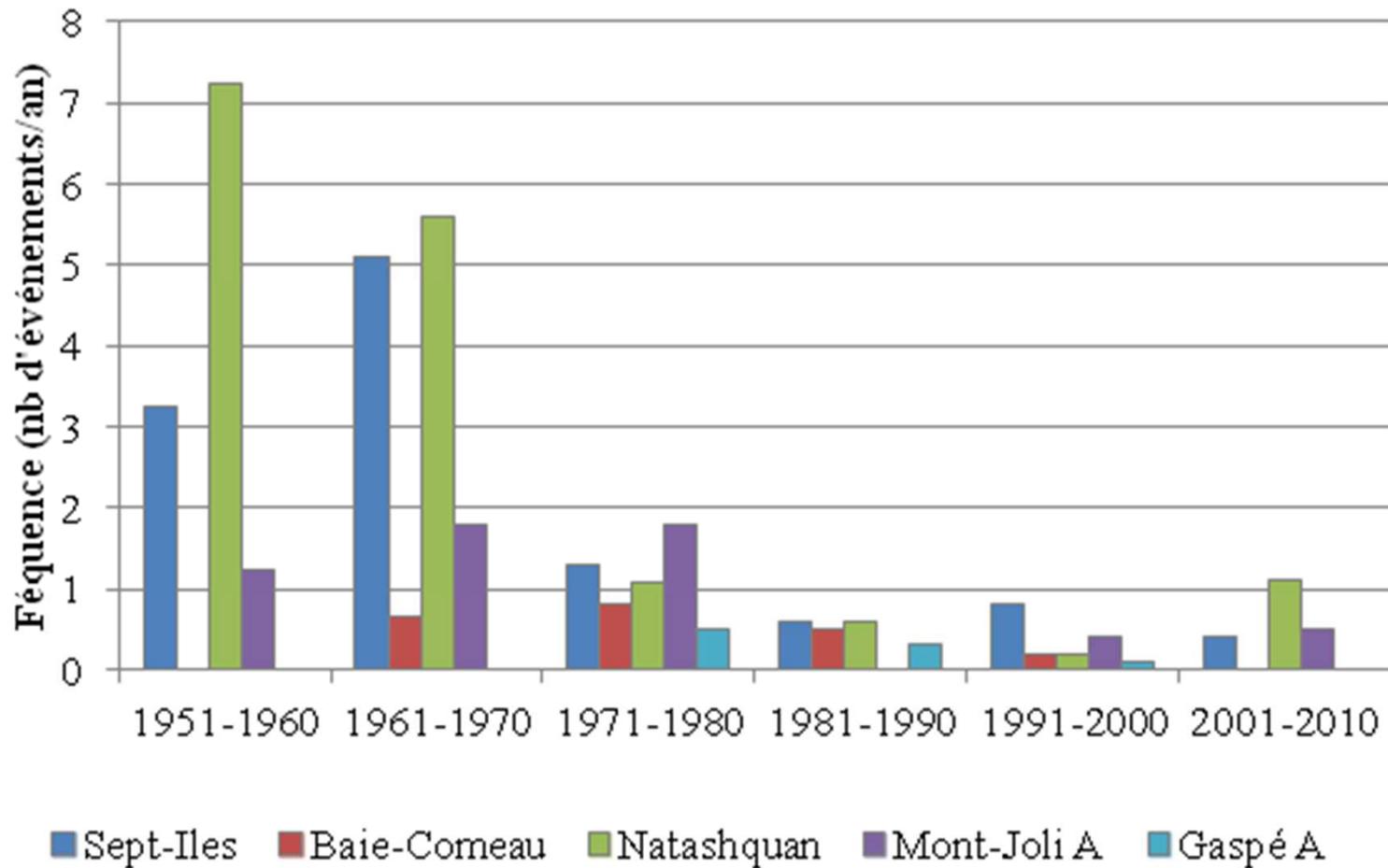
**Îles-de-la-Madeleine**

**16 cm/siècle:  
dernier 600 ans**

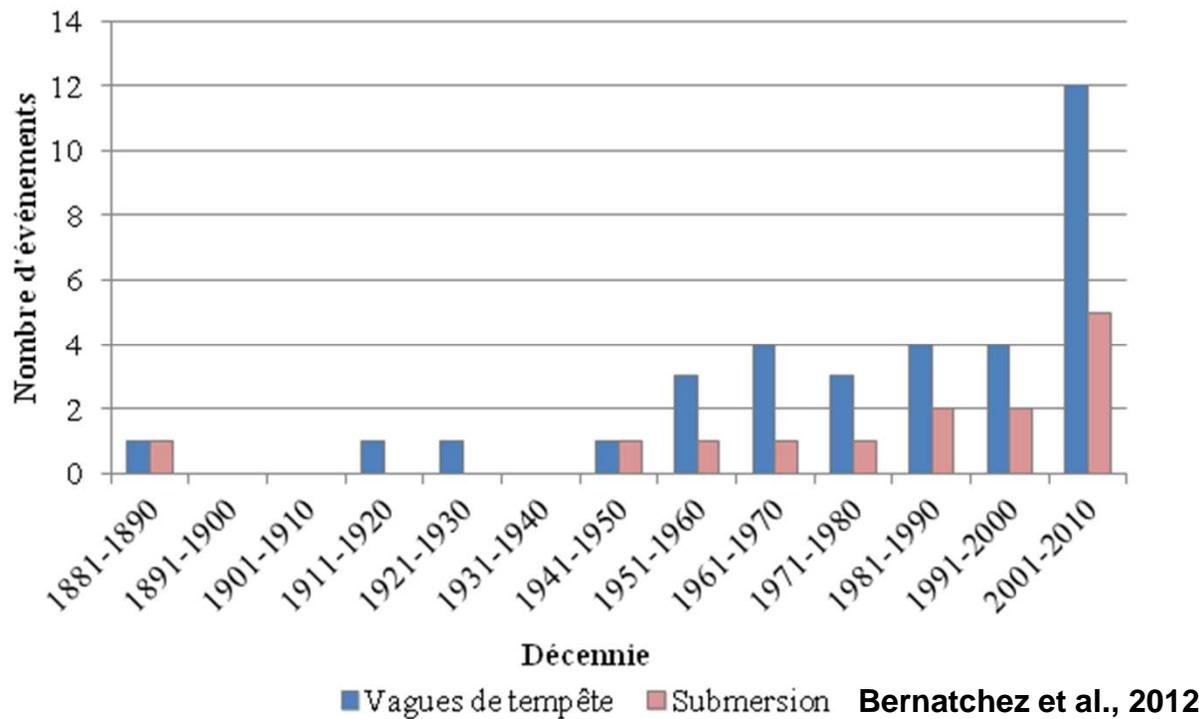
**35 cm/siècle  
dernier siècle**

## Augmentation de la fréquence des tempêtes?

Nombre d'événements avec des vents supérieurs ou égal à 70km/h



# Nombre d'événements de vagues de tempête et de submersion côtière par décennie qui ont eu un impact sur la côte à l'échelle régionale basé sur des archives



Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec



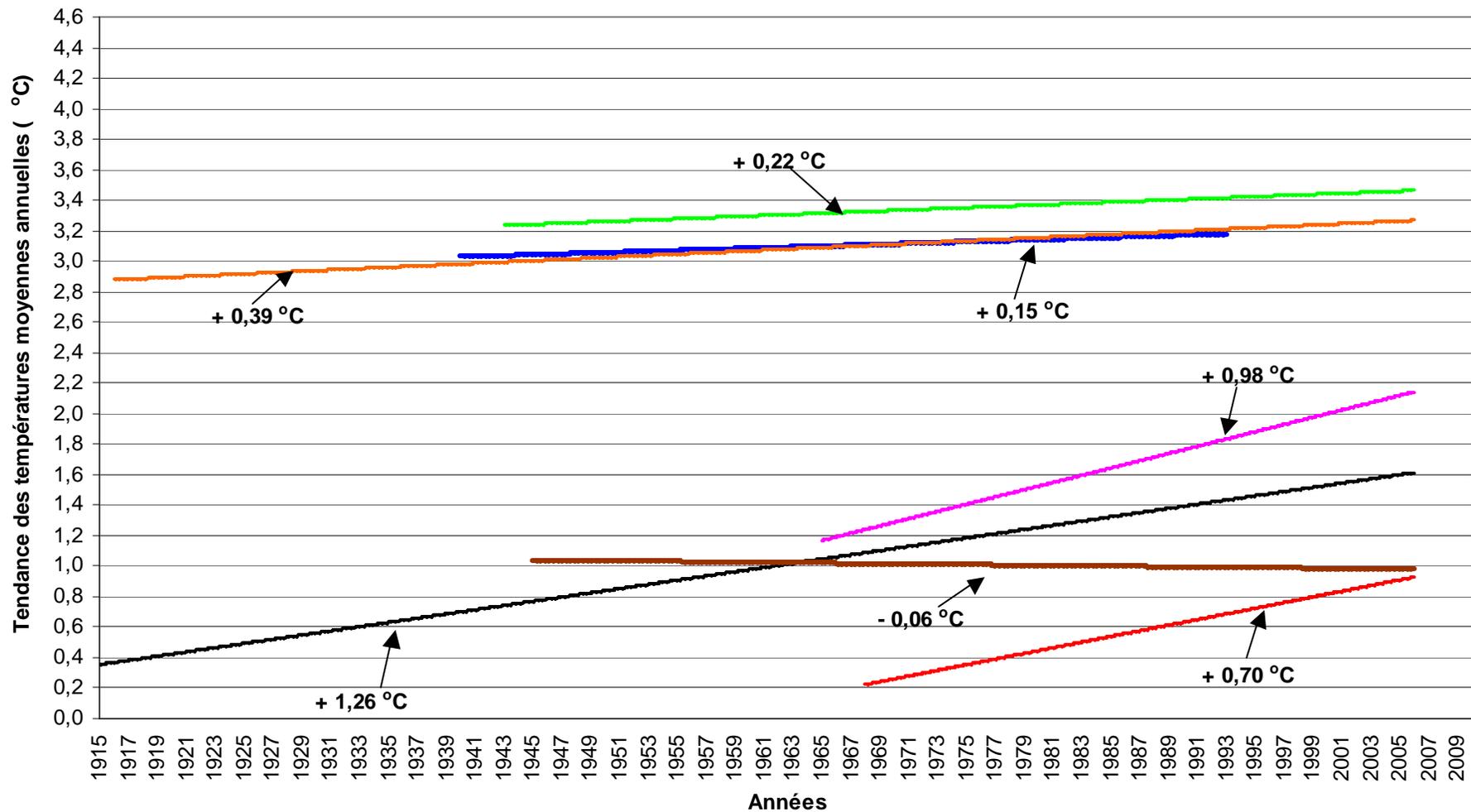
# Causes de l'érosion côtière

- 1) Hausse du niveau marin relatif/hausse globale des océans - tempêtes
- 2) Diminution de la glace littorale
- 3) Hausse des cycles gel-dégel/redoux hivernaux et pluies hivernales
- 4) Les activités et interventions humaines et le déficit sédimentaire des plages



CLIMAT

# Est-ce que le climat se réchauffe ?



— Linéaire (Mont-Joli)

— Linéaire (Natashquan)

— Linéaire (Blanc-Sablon)

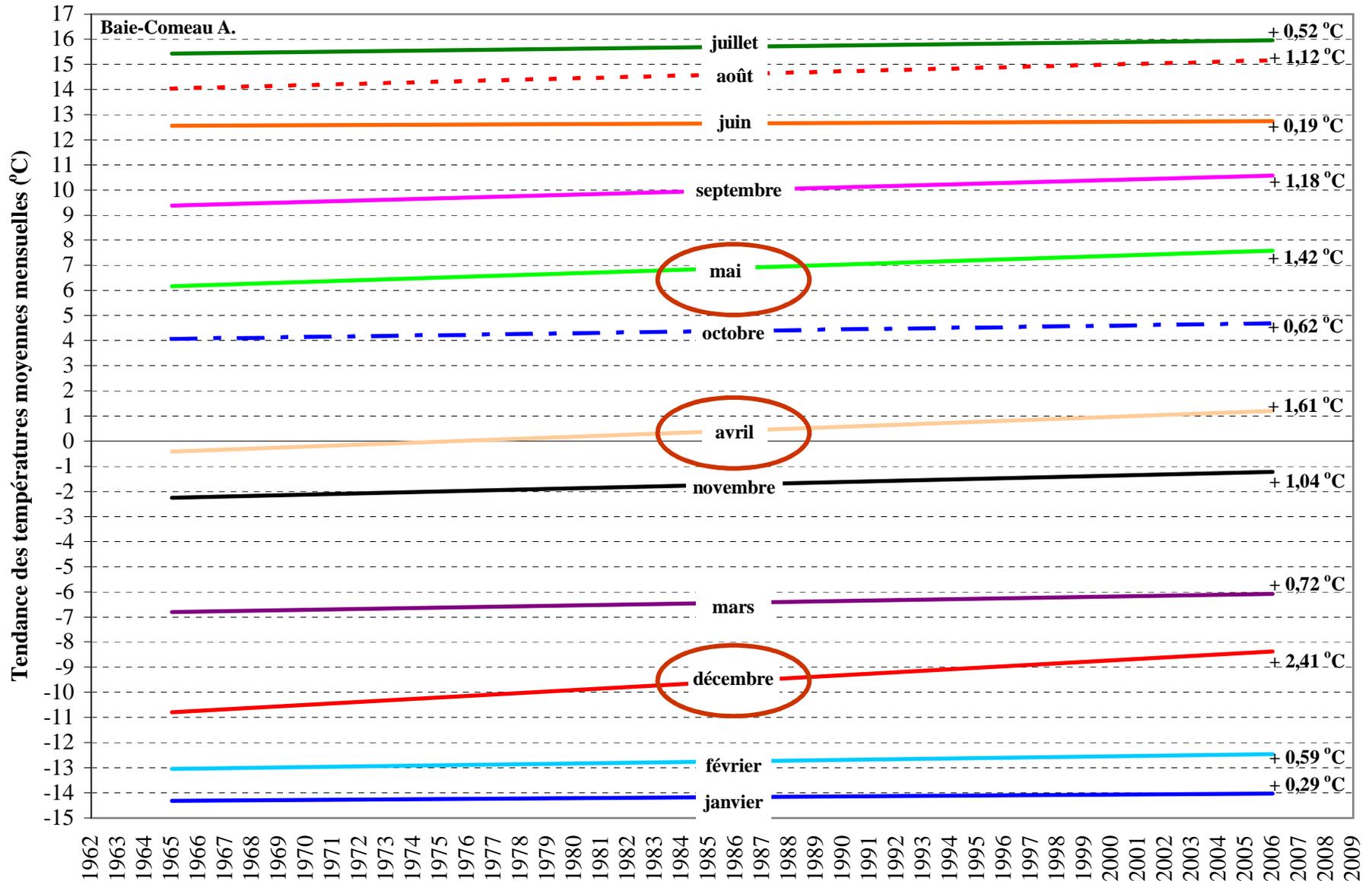
— Linéaire (Cap-Madeleine)

— Linéaire (Gaspé)

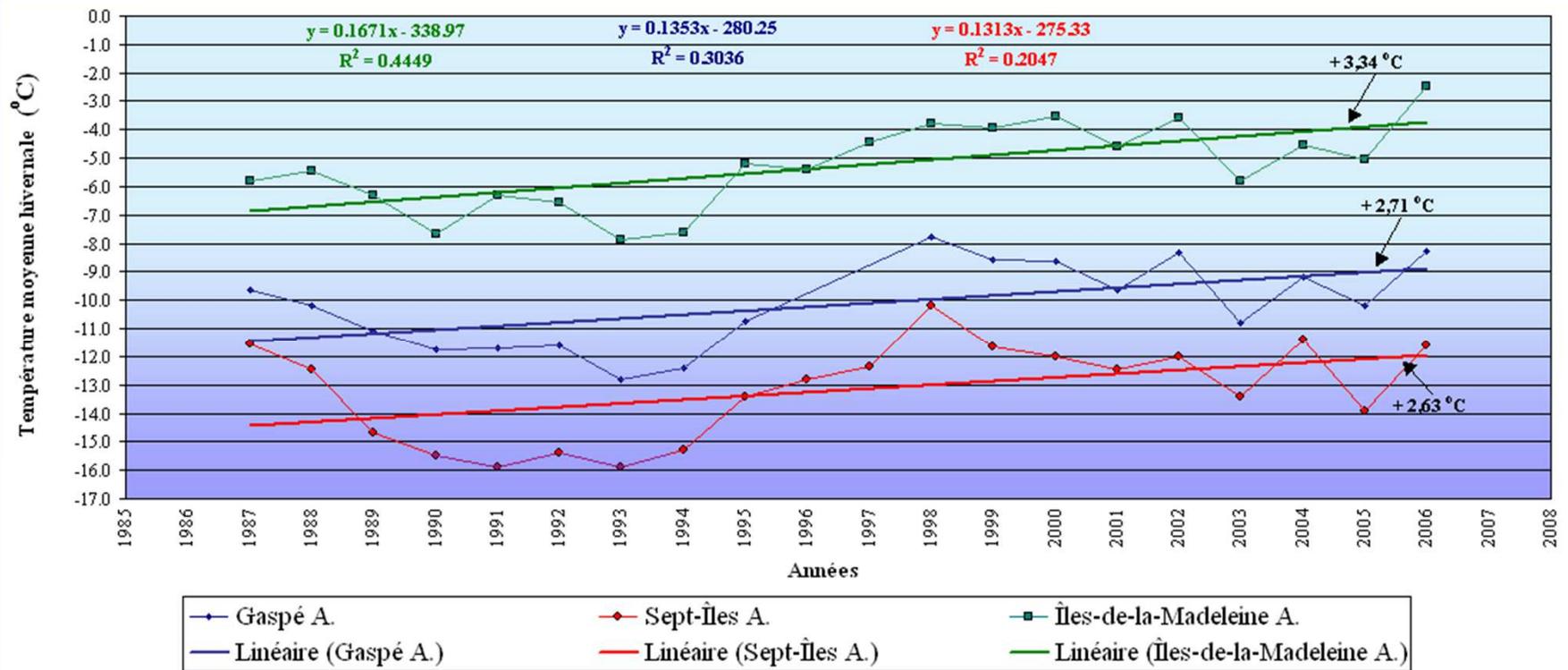
— Linéaire (Sept-Îles A)

— Linéaire (Baie-Comeau A.)

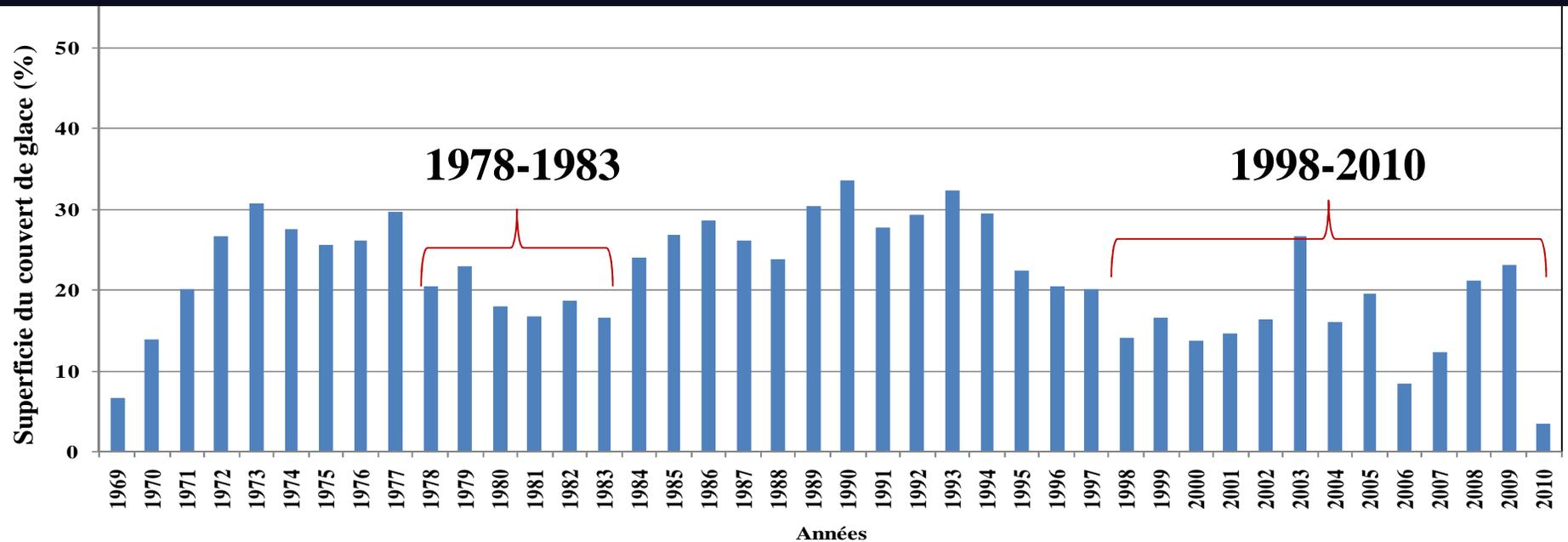
# Hausse plus marquée au début et à la fin de la saison froide



# Température hivernale



# Superficie de la couverture de glace de mer sur le golfe du Saint-laurent



Données relevées par le Service Canadien des Glaces



Photo: Jocelyne Fugère



**15 février 2007**  
**Val Marguerite**



**La diminution de la largeur de la glace littorale favorise l'érosion des plages**



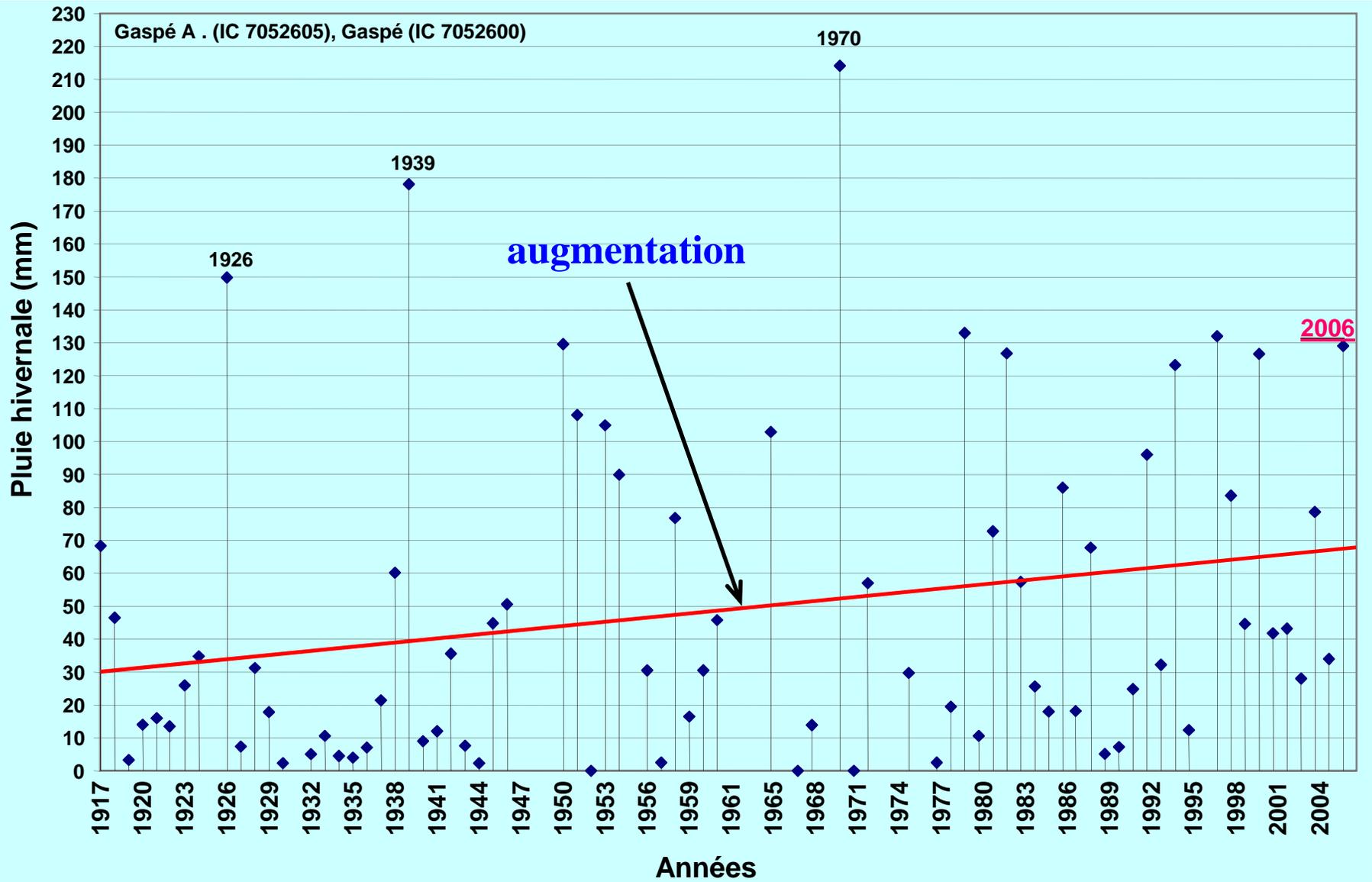
**Réflexion des vagues sur le pied de glace provoquant l'abaissement des plages**

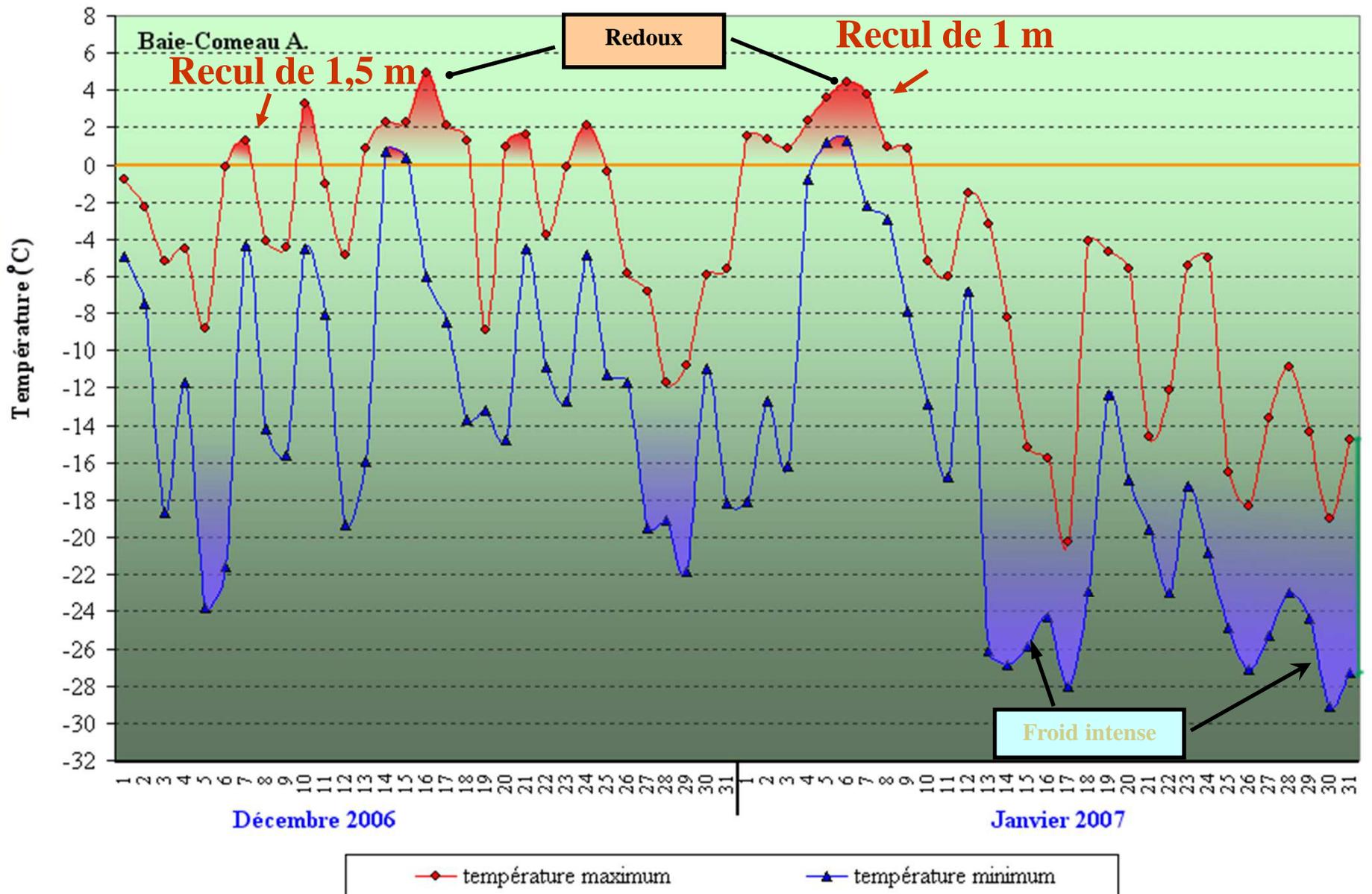
## Les processus cryogéniques (gel-dégel)



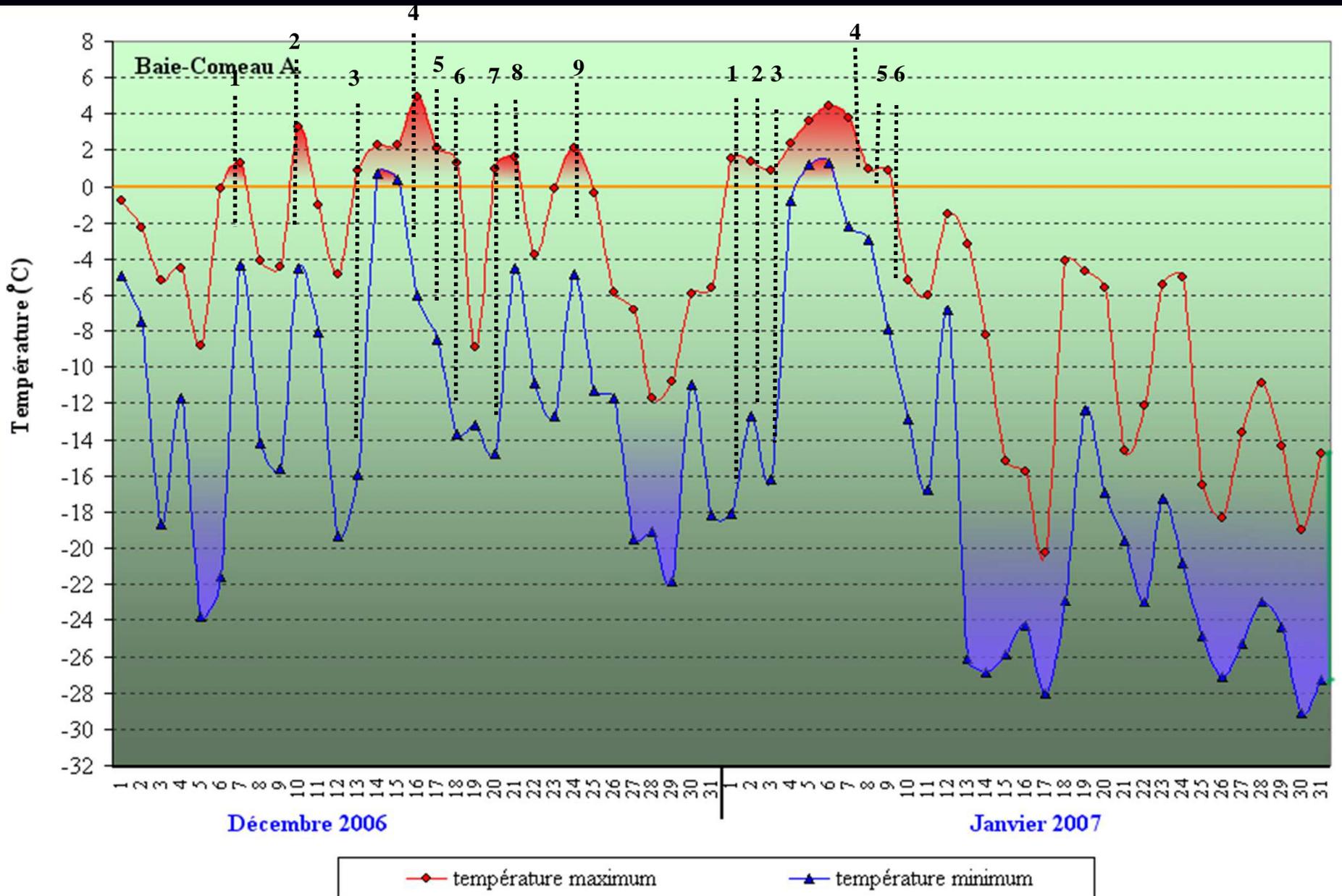
**Rivière-Saint-Jean**

# Pluies hivernales (déc., janv., fév.)





# Cycles de gel et de dégel



# Caméras de surveillance



Baie de plaisance



Pointe-au-Loup

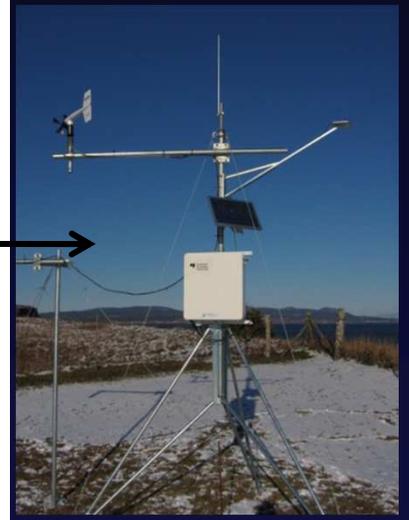
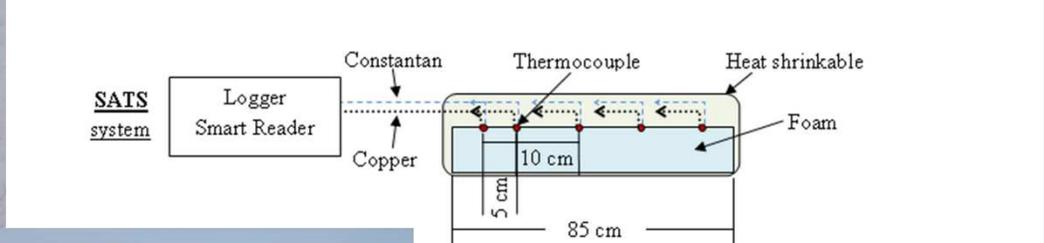
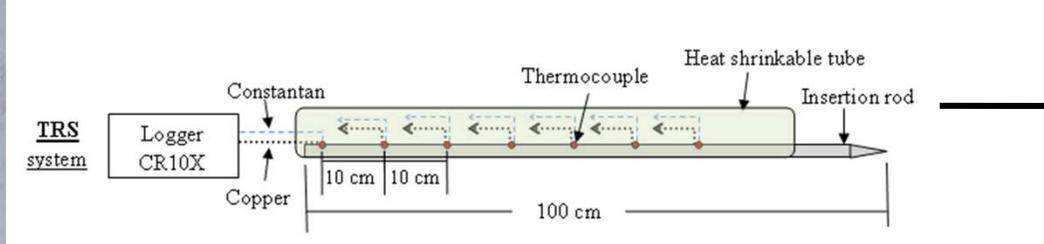
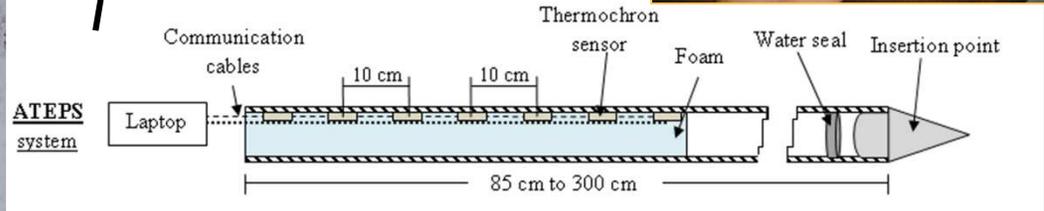


Rivière-Saint-Jean



Rivière-Saint-Jean

# Réseau de tiges thermiques autonomes



2008-12-11 10:00:00 AM T

# Influence des redoux hivernaux et rayonnement solaire

-12,5°C



2008-12-11 11:00:00 AM T

-12,2°C



2008-12-11 12:00:00 PM T

-11,9°C



2008-12-11 1:00:00 PM T

-12,2°C



2008-12-11 2:00:00 PM T

-12,8°C



2008-12-11 3:00:00 PM T

-13,5°C



## Formation de coulées boueuses



## Gélifraction dans les falaises rocheuses





**L'importance de la glace côtière pour le développement du couvert nival**

# Causes de l'érosion côtière

- 1) Hausse du niveau marin relatif/hausse globale des océans - tempêtes
- 2) Diminution de la glace littorale
- 3) Hausse des cycles gel-dégel/redoux hivernaux et pluies hivernales
- 4) Les activités et interventions humaines et le déficit sédimentaire des plages



CLIMAT

# Péninsule de Manicouagan, Côte-Nord

## Hausse de l'artificialité

### Manicouagan

1931 : 1 %

1965 : 2 %

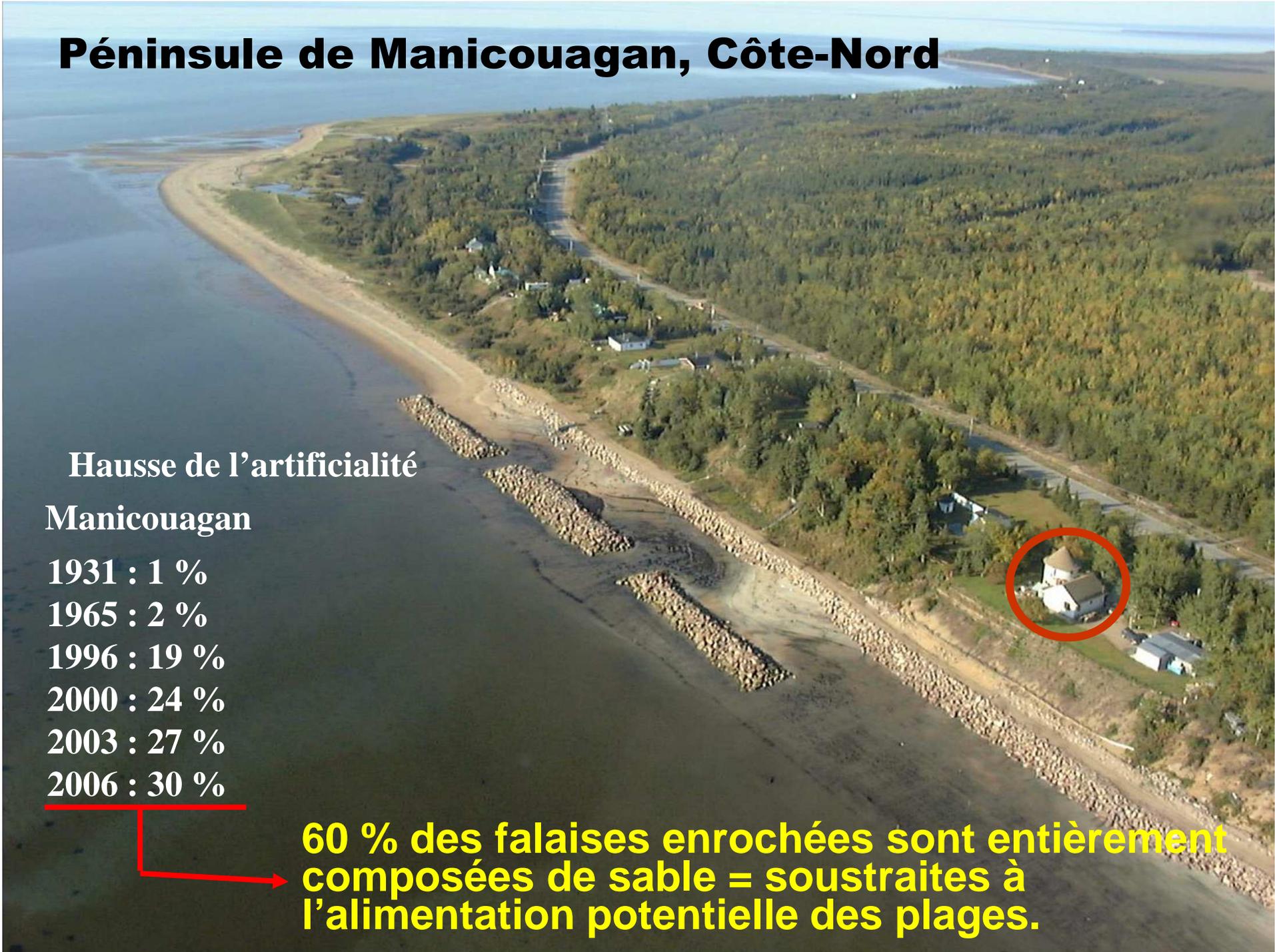
1996 : 19 %

2000 : 24 %

2003 : 27 %

2006 : 30 %

60 % des falaises enrochées sont entièrement composées de sable = soustraites à l'alimentation potentielle des plages.

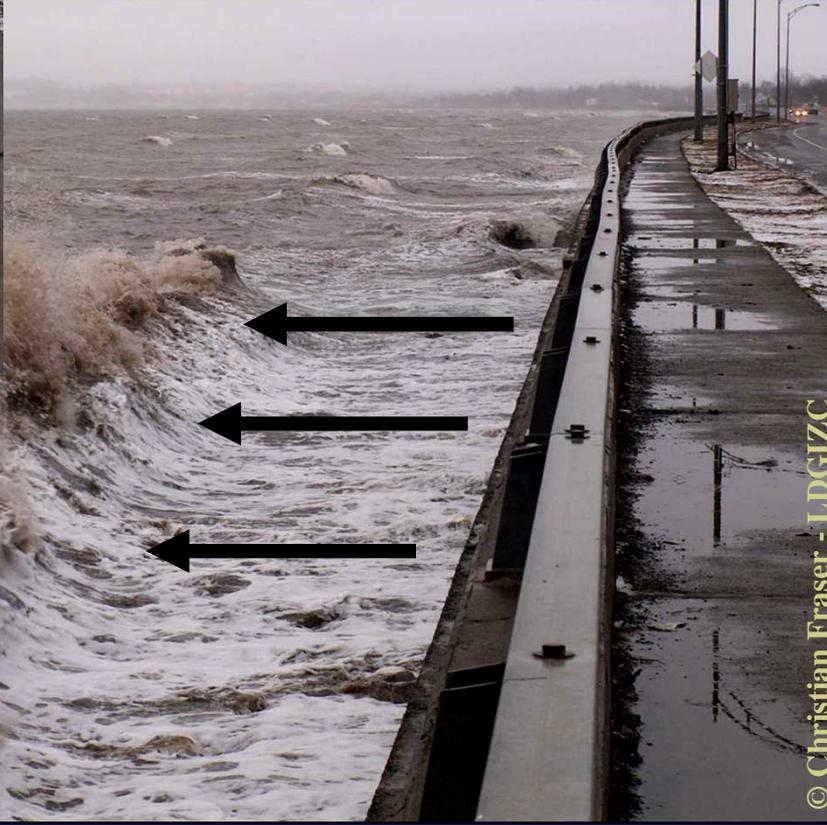


**Perturbations anthropiques :  
ouvrages de protection = réduction importante de la largeur des plages**



**Réduction:**

- 84 % (Région de Sept-Îles)
- 71 % (Région de Percé)
- 70 % (Région de Bonaventure - Saint-Siméon)
- 86 % (Îles de la Madeleine)



## Les impacts: Abaissement et rétrécissement de la plage



 Hausse de l'artificialité sur les côtes meubles

=

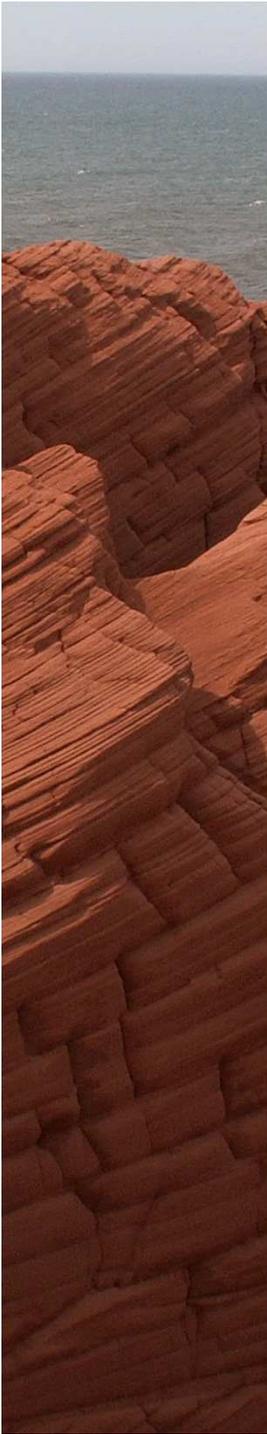
 Abaissement et ou disparition de la plage

=

 Hausse des risques de submersion

=

 Baisse de la résilience côtière



# Plan de présentation

**1) Principaux enjeux associés aux aléas côtiers**

**2) Bilan de l'érosion et de la submersion**

**3) Causes de l'érosion côtière**

**4) Travaux actuels du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et de la Chaire de recherche en géoscience côtière**

# Érosion ↔ Submersion

## Chantier 1

Quantifier l'érosion récente et future

- réseaux de suivi -
- modélisation des CC

## Chantier 2

Identifier les facteurs clés de l'érosion et de la submersion

- archives – données météo-marines-
- bilan sédimentaire – aménagement du littoral et perturbations anthropiques-

## Chantier 3

Modéliser la submersion

- niveaux eustatiques et isostatiques
- scénarios de hausse du niveau marin - tempêtes

## Chantier 4

Approche pour cartographier risque de submersion

- outils pour les gestionnaires du territoire

## Chantier 5

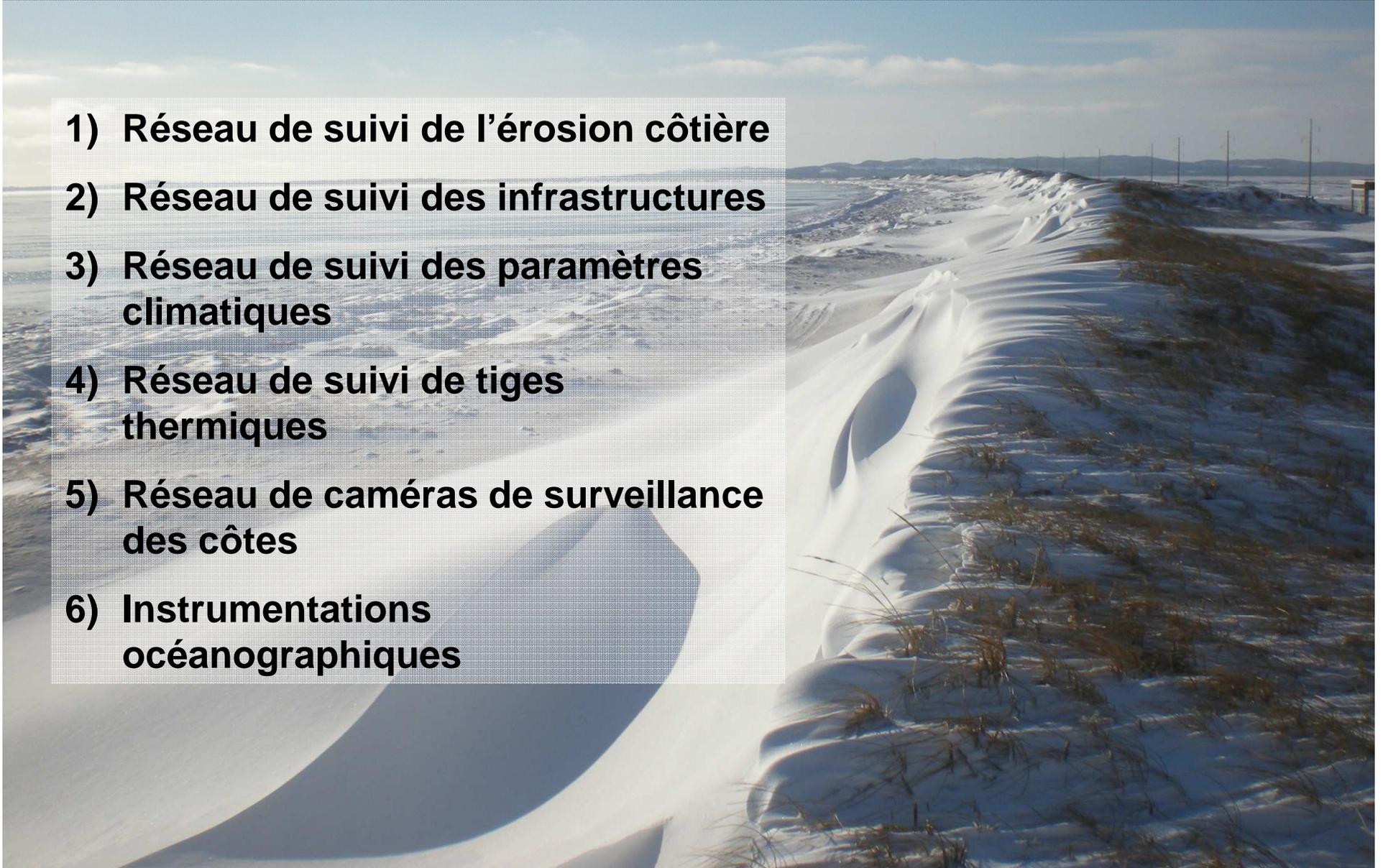
Évaluer la vulnérabilité

- grille d'analyse – outils de planification et d'intervention

## *Chantier 1*

*Quantifier l'influence des conditions météo-marines sur l'érosion des côtes à l'aide des données mesurées provenant des réseaux de suivi*

- 1) Réseau de suivi de l'érosion côtière
- 2) Réseau de suivi des infrastructures
- 3) Réseau de suivi des paramètres climatiques
- 4) Réseau de suivi de tiges thermiques
- 5) Réseau de caméras de surveillance des côtes
- 6) Instrumentations océanographiques



## **Chantier 1**

***Quantifier l'influence des conditions météo-marines sur l'érosion des côtes à l'aide des données mesurées provenant des réseaux de suivi***

- **Identifier les paramètres clés et les seuils critiques pour l'érosion côtière;**
- **Modéliser les paramètres climatiques clés selon des scénarios climatiques par Ouranos;**
- **Modéliser les temps de retour des conditions météo-marines futures en fonction des CC;**



**Calculer à l'échelle régionale des taux futurs selon les types de systèmes côtiers et adapter des marges de sécurité en érosion côtière tenant compte des CC.**

## Chantier 2

### Identifier et analyser les facteurs environnementaux contribuant à la recrudescence de l'érosion et de la submersion



A) Conditions météo-marines



B) Bilan sédimentaire des plages

C) Organisation et aménagement du territoire



## Chantier 2

# Identifier et analyser les facteurs environnementaux contribuant à la recrudescence de l'érosion et de la submersion

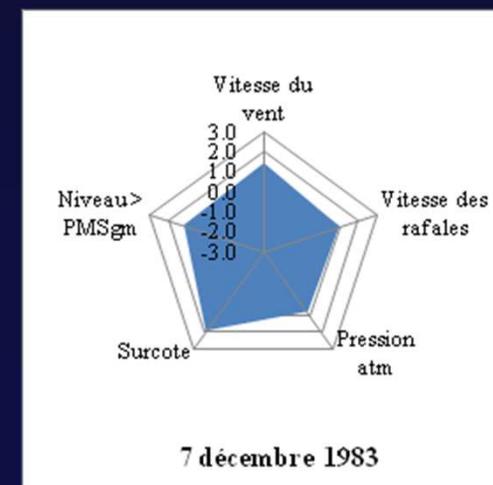
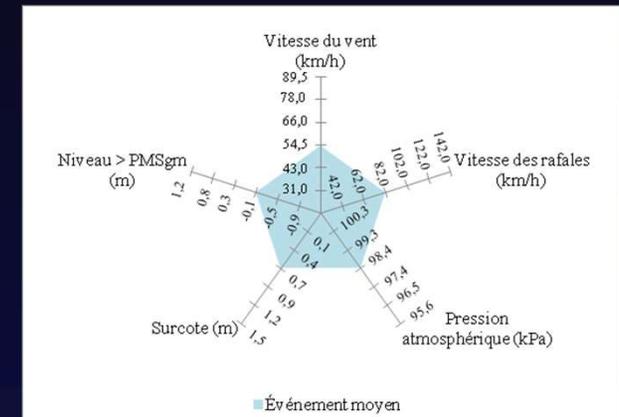
### A) Conditions météo-marines

Analyse par région des conditions menant aux dommages sur la côte par l'érosion et la submersion

(Bas-Saint-Laurent, Gaspésie- Îles-de-la-Madeleine, Côte-Nord)

Événements/ Paramètres	1884-11-05	1913-10-20	1927-10-18	1950-12-06	1953-04-13	1960-09-12	1960-12-17	1962-12-10	1963-11-02	1968-11-20	1968-12-05	1974-11-14	1976-10-21	1980-10-26	1983-12-07	1989-12-03	1990-05-26
Vitesse du vent						X	X	X	X		X		X		X	X	
Vitesse des rafales						X	X	X			X		X	X	X	X	
Pression atmosphérique						X	X	X	X	X	X			X	X	X	
Surcote										X	X		X		X		
Niveau > PMSGM				X	X			X	X	X	X			X	X	X	
Événements/ Paramètres	1990-08-01	1995-12-10	1996-10-15	2000-10-28	2003-10-15	2004-10-16	2004-12-11	2005-04-25	2005-09-30	2005-10-15	2005-12-05	2007-12-17	2008-12-22	2010-03-24	2010-12-06	2010-12-14	2010-12-21
Vitesse du vent			X	X								X	X				
Vitesse des rafales				X					X			X	X				
Pression atmosphérique					X					X	X	X	X		X		
Surcote				X				X		X		X	X	X	X	X	X
Niveau > PMSGM		X		X		X	X	X		X	X		X	X	X		X

Bernatchez et al., 2012



## **Chantier 2**

### **Identifier et analyser les facteurs environnementaux contribuant à la recrudescence de l'érosion et de la submersion**



#### **B) Bilan sédimentaire des plages**

**Projets de maîtrise :**

**Caroline Pinsonnault:**

**Évaluer les facteurs responsables de la sensibilité de la côte à l'érosion sur la rive sud du Saint-Laurent**

*(dir. Guillaume Marie, UQAR et co-dir. Pascal Bernatchez, UQAR).*

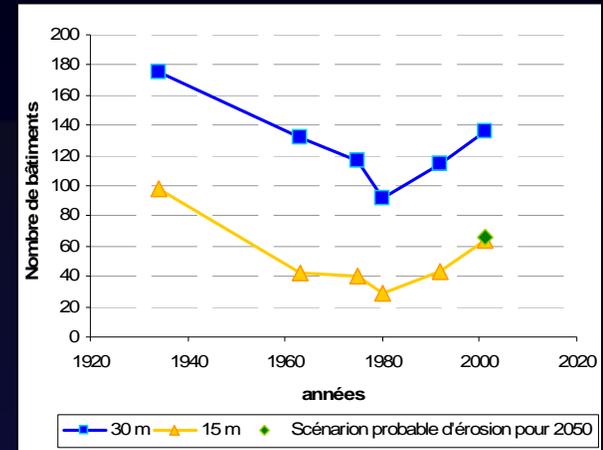
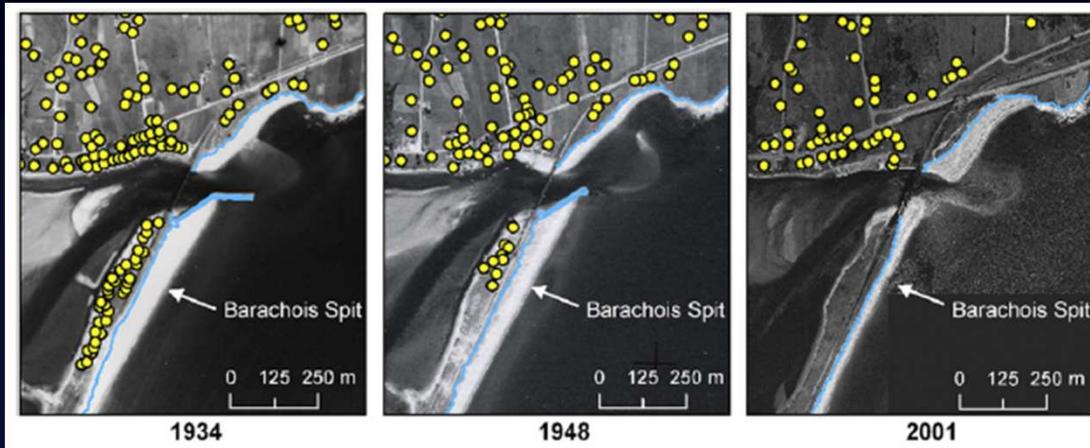
**Evelyne Arsenault :**

**Évolution du bilan sédimentaire des plages entre Baie des Sables et Matane.**

*(dir. Pascal Bernatchez, UQAR)*

# Évolution des infrastructures à risque d'érosion

## C) Organisation et aménagement du territoire



Ocean & Coastal Management 54 (2011) 290–301



Contents lists available at ScienceDirect

Ocean & Coastal Management

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ocecoaman](http://www.elsevier.com/locate/ocecoaman)



Effectiveness of land management measures to reduce coastal georisks, eastern Québec, Canada

Susan Drejza<sup>a,b,\*</sup>, Pascal Bernatchez<sup>a,b,c</sup>, Clermont Dugas<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Geography Department, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

<sup>b</sup> Research Chair in Coastal Geoscience, UQAR, 300 allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

<sup>c</sup> Centre d'études nordiques, UQAR, 300 allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

### **Chantier 3**

***Modéliser le phénomène de submersion dans un contexte de changements environnementaux (forçages météo-marines, perturbations anthropiques, bilan sédimentaire)***



- a) Identifier des scénarios pour chacune des régions = analyse de la composante isostatique et eustatique
- b) Implique de reconstituer les variations du niveau marin relatif à long terme et à l'échelle régionale

## ***Chantier 3***

**Reconstituer les variations du niveau marin relatif  
aux îles de la Madeleine et dans la baie des Chaleurs et  
identifier des scénarios de hausse à utiliser à l'échelle régionale**

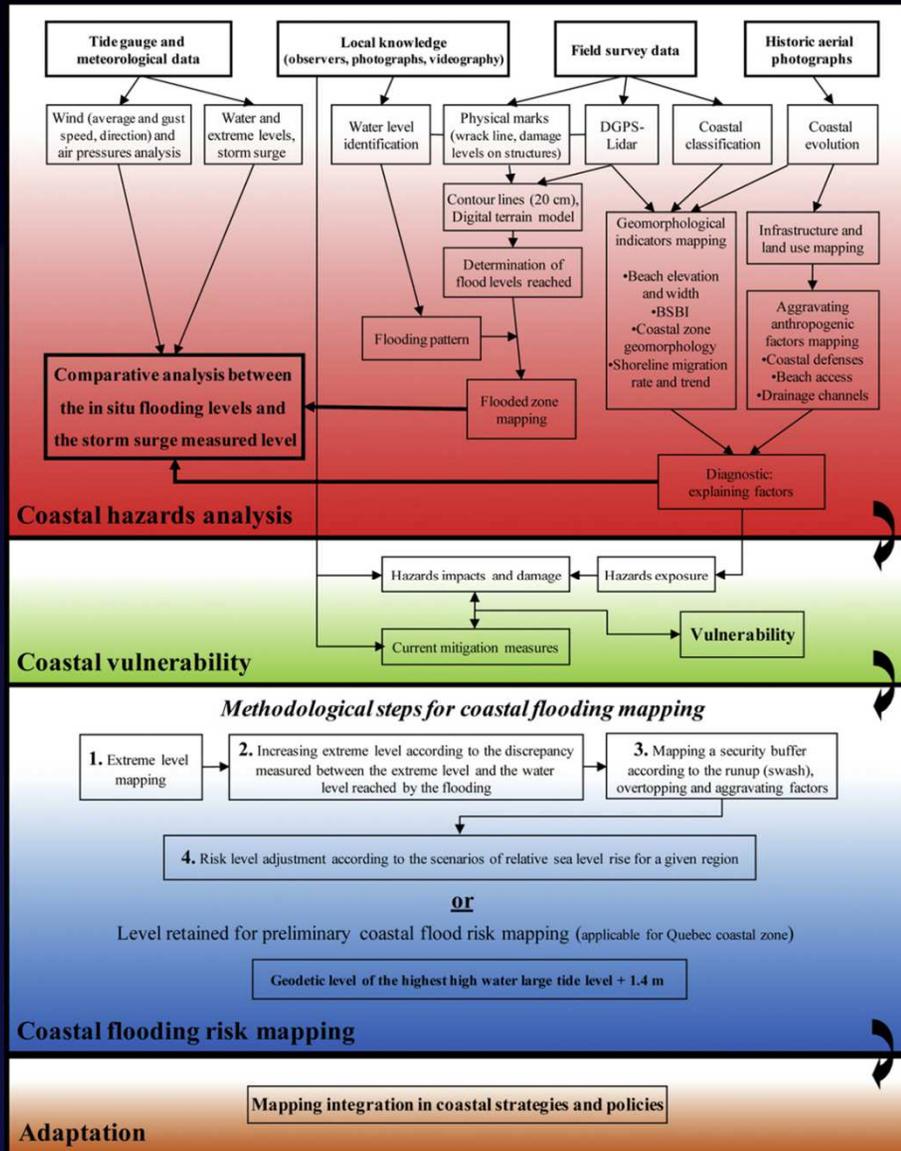
**Thèse de doctorat d'Audrey Mercier-Rémillard  
(dir. Guillaume St-Onge, ISMER; co-dir.: Pascal Bernatchez et  
Bernard Héту, UQAR)**

**Stage post-doc de Robert Barnett  
(dir. Pascal Bernatchez; Michelle Garneau, UQAM  
et Roland Gehrels, Université Plymouth, Angleterre)**



# Chantier 4

## Développer une approche pour la cartographie du risque de submersion côtière

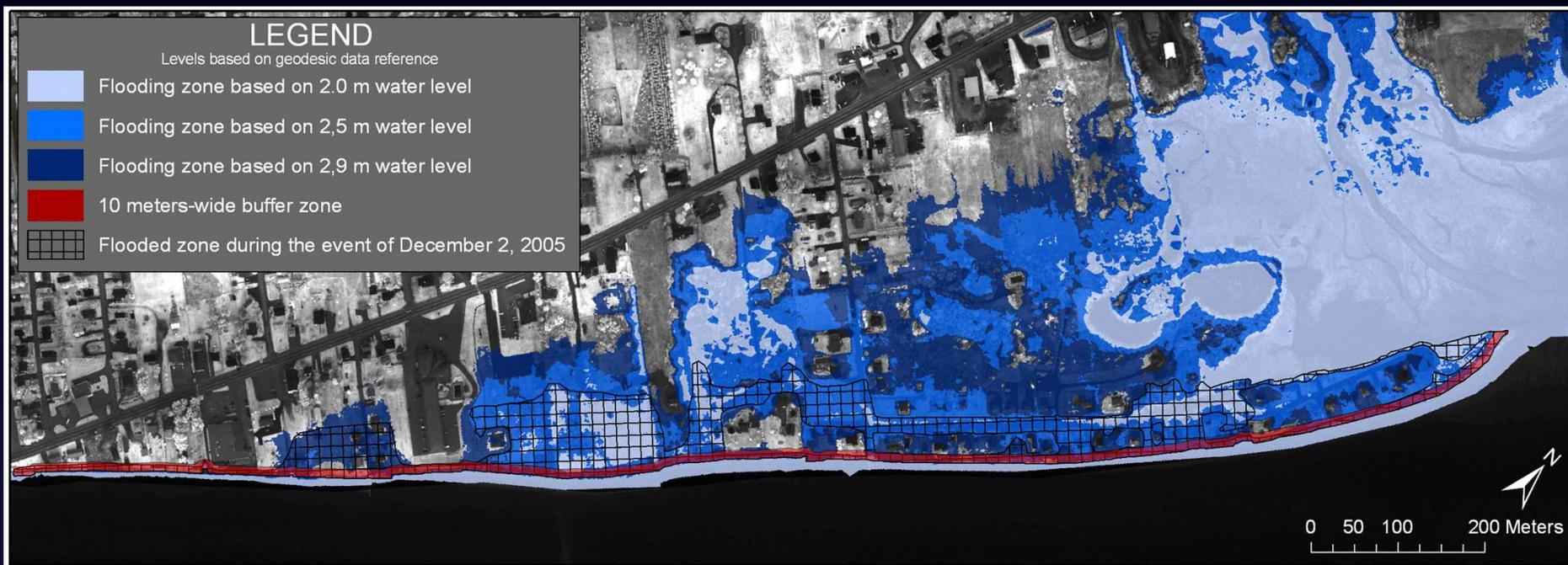


Thèse de doctorat de David Didier

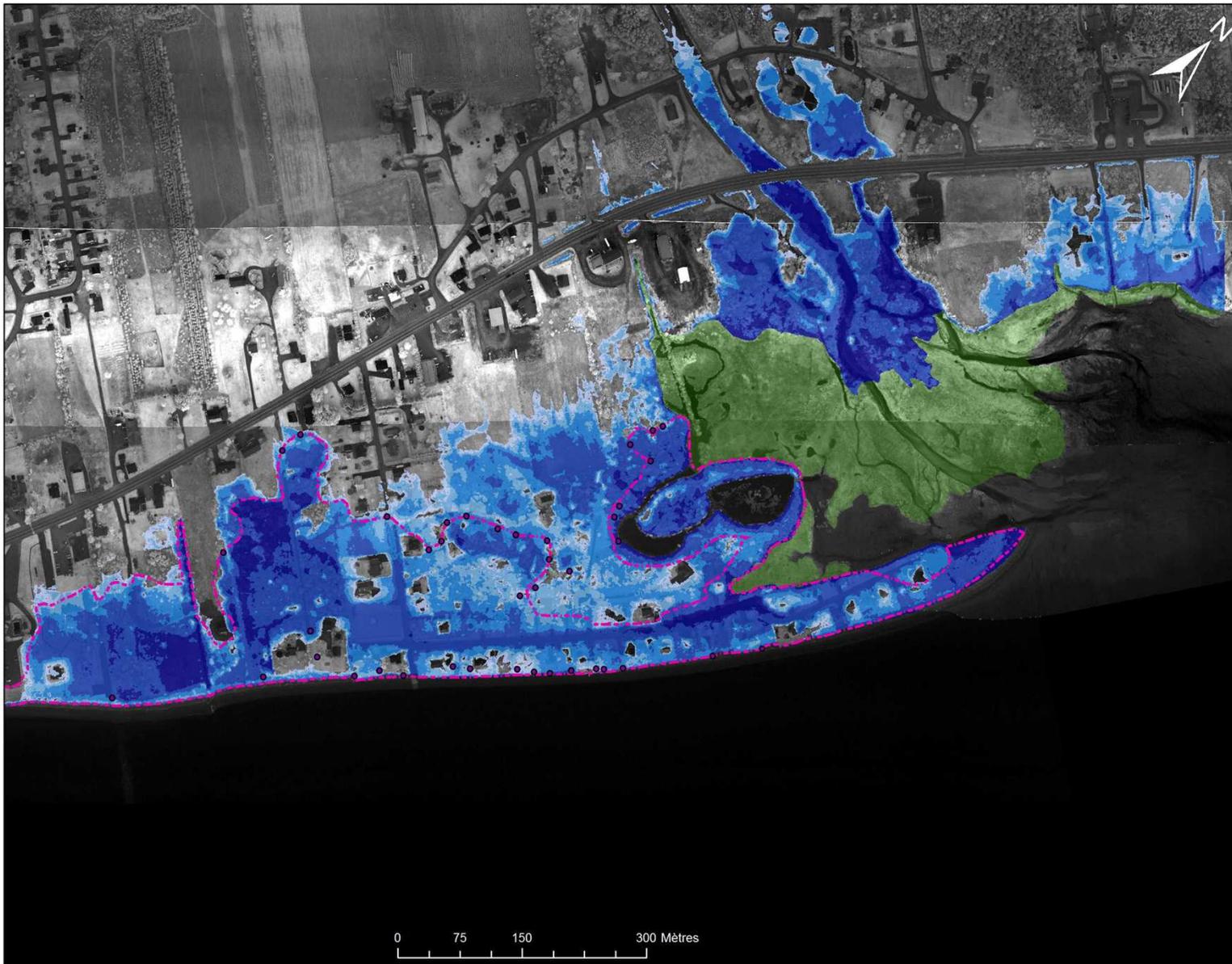
Modéliser le phénomène de submersion et développer une approche de cartographie du risque de submersion dans un contexte de variations du niveau marin relatif

(dir. Pascal Bernatchez, UQAR et Chercheurs Université de Bretagne, Brest)

# Cartographie du risque de submersion côtière à Maria

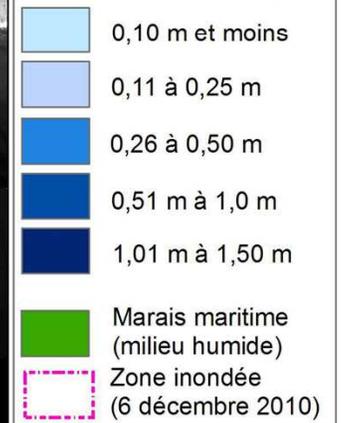


# Tempête du 6 décembre 2010



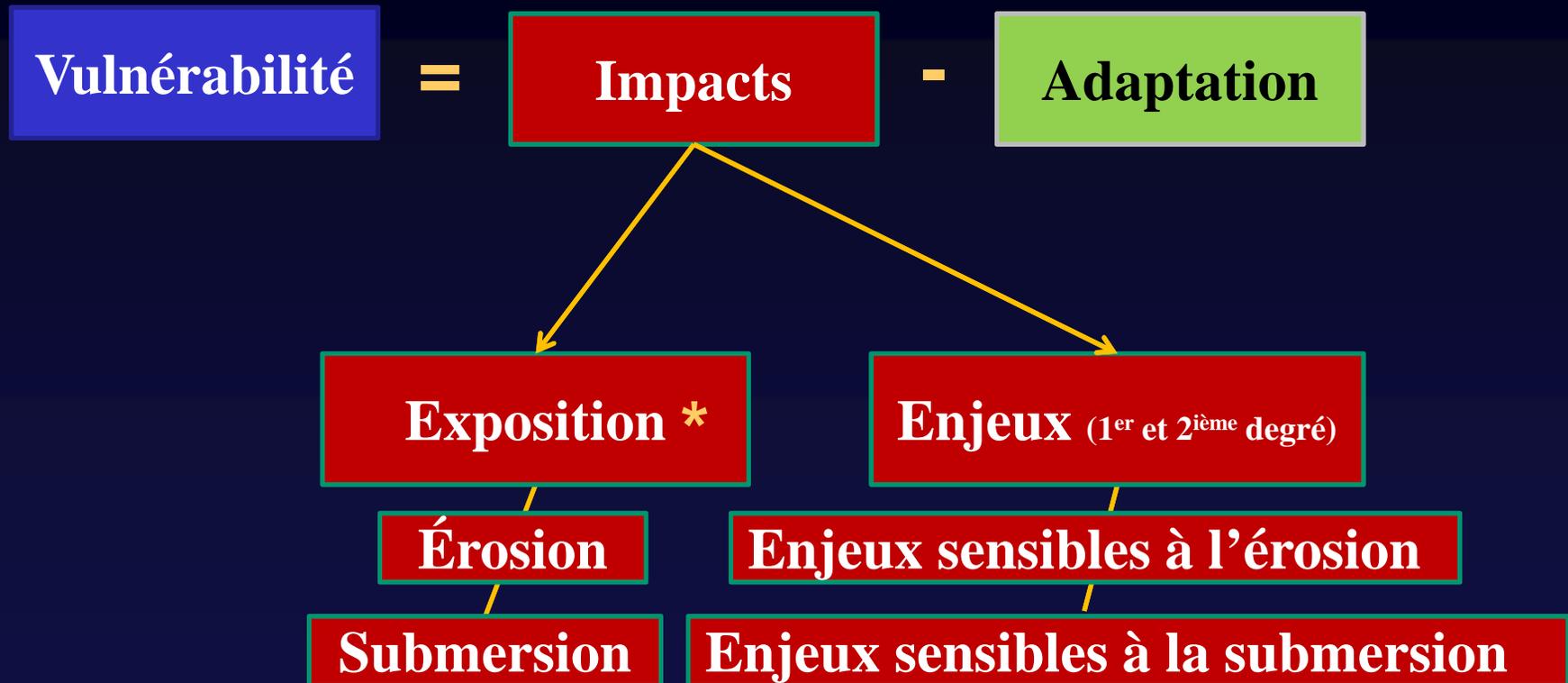
**Cote = 2,9 m**  
(géodésique)

Estimation de la  
hauteur d'eau (m)



## Chantier 5

### Analyse de la vulnérabilité des communautés et des infrastructures côtières



- Analyse des enjeux actuels associés à l'érosion côtière au Québec maritime basée sur le réseau de suivi des infrastructures

## **Autres projets d'intérêt en cours**

- **Sensibilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion (MTQ);**
- **Analyse coûts-avantages sur les solutions d'adaptation (Ouranos);**
- **Diagnostic de vulnérabilité des communautés côtières (Projet de doctoral de Ursule Boyer-Villemaire)**

## Conclusion

- **Beaucoup de connaissances acquises et beaucoup de chantiers en cours;**
- **Importance de la diffusion: publications scientifiques et partage des données;**
- **Importance d'établir des ponts entre la recherche et le milieu municipal;**
- **Importance que les municipalités soient outillées pour:**
  - 1) orienter les citoyens vers les meilleures options d'adaptation;**
  - 2) orienter le développement vers les zones sans risque;**
  - 3) éviter les erreurs du passé!**

MERCI !

