

# Impact des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine

---

J.-M. Lemieux<sup>1,2</sup>, J. Hassaoui<sup>1</sup>, J. Molson<sup>1,2</sup>, R. Therrien<sup>1,2</sup>, P. Therrien<sup>1</sup>,  
M. Chouteau<sup>3</sup>, M. Ouellet<sup>4</sup>

---

(1)



UNIVERSITÉ  
LAVAL

(2)



CENTRE D'ÉTUDES NORDIQUES  
CEN Centre for Northern Studies

(3)



ÉCOLE  
POLYTECHNIQUE  
MONTREAL

(4)

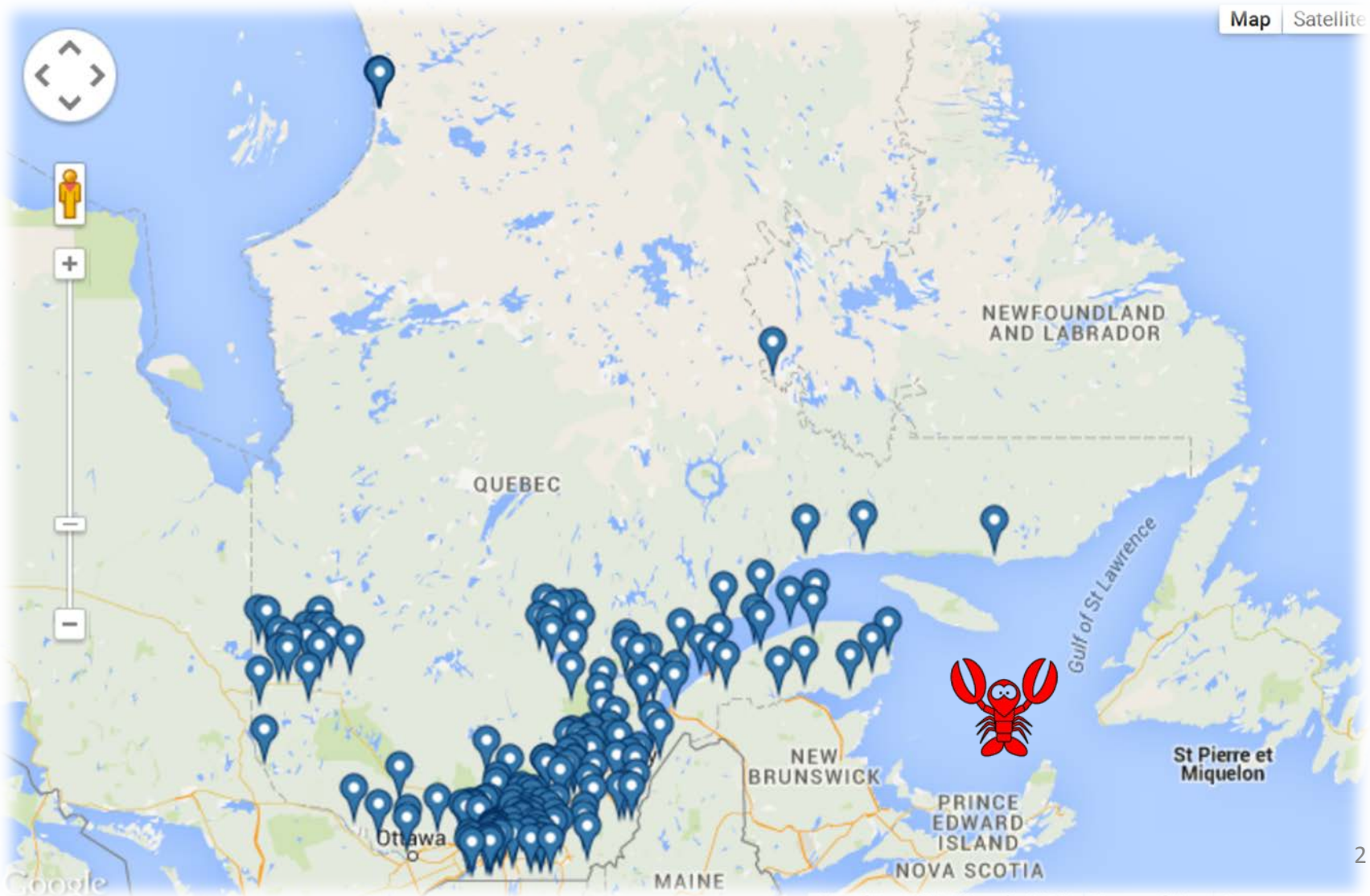
*Développement durable,  
Environnement et Lutte  
contre les changements  
climatiques*

Québec 

3 février 2015



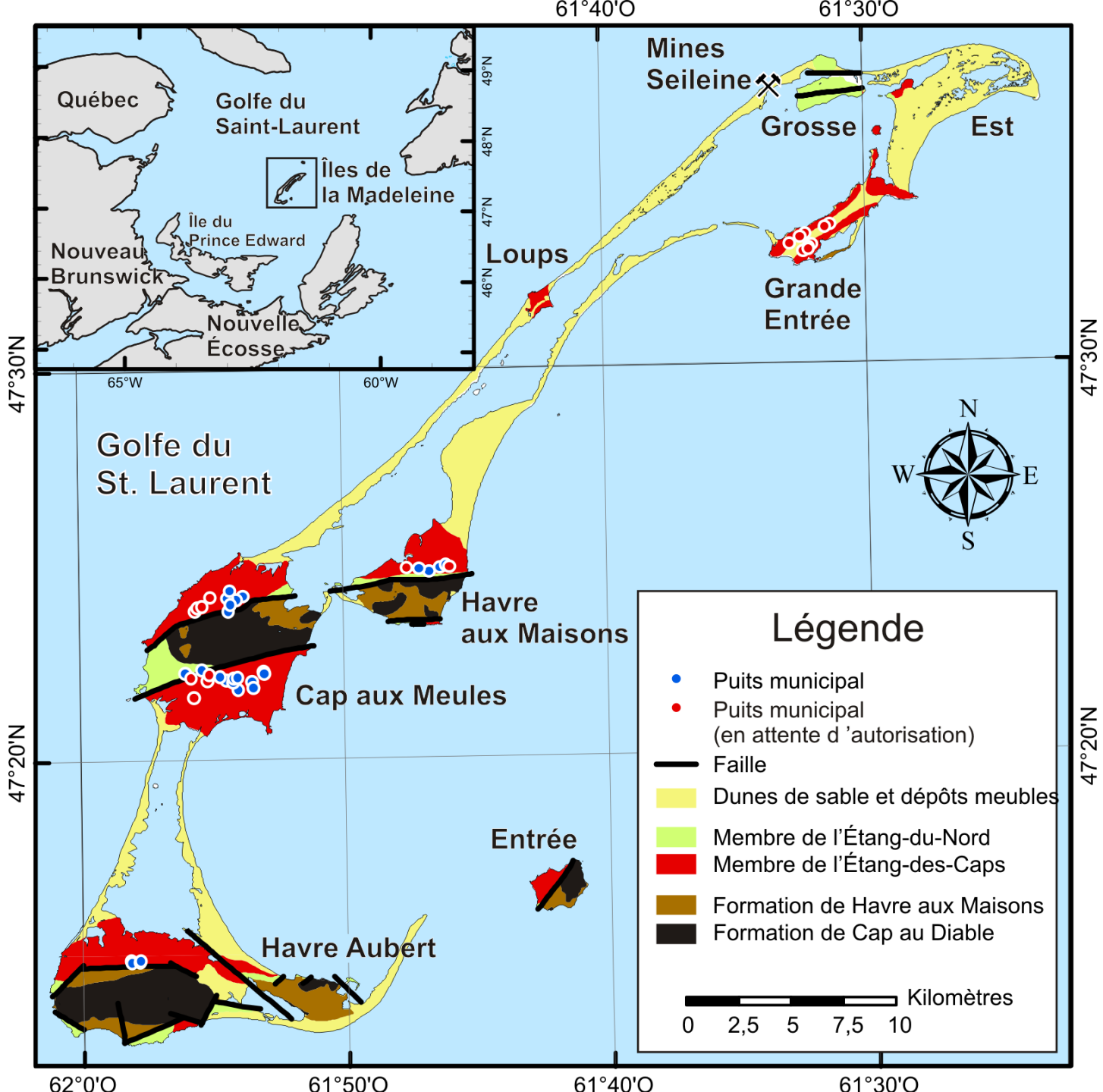
# Réseau de suivi des eaux souterraines (RSES) du Québec (MDDELCC)

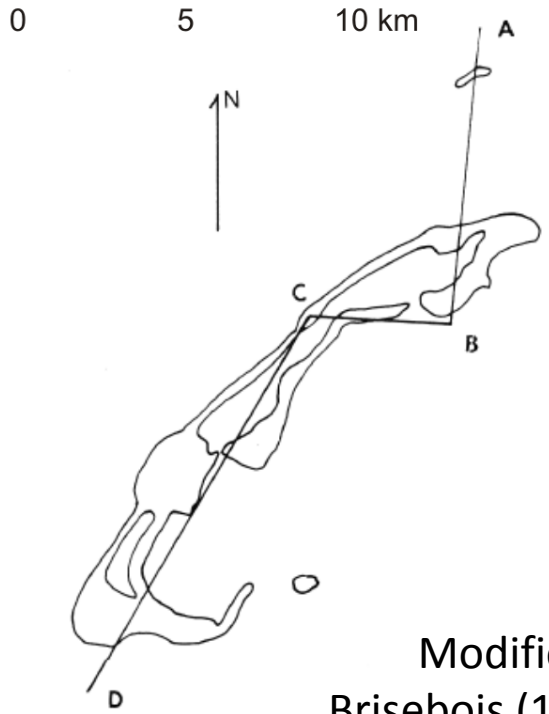
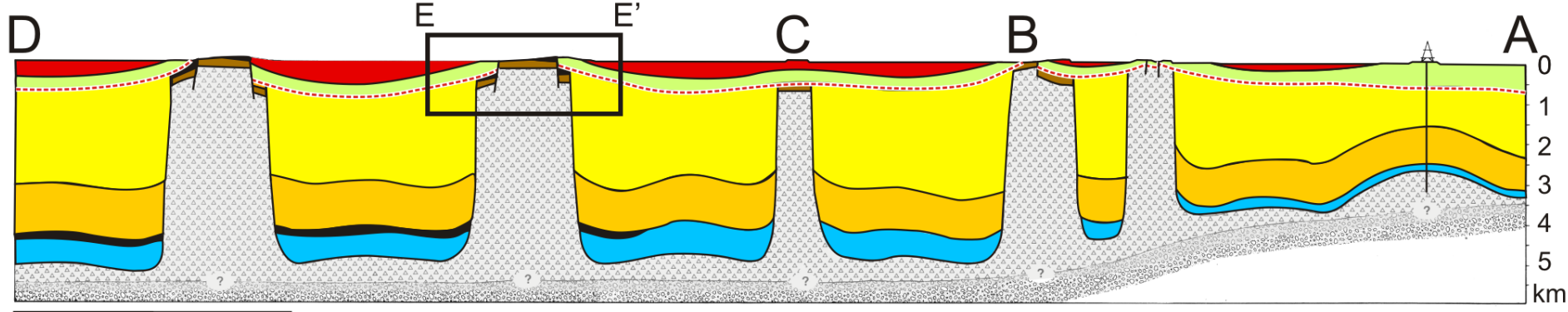


# Objectif

- Prédire l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine.
  - Simulations numériques
  - Changements climatiques observés et anticipés
- Émettre des recommandations sur le suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines.

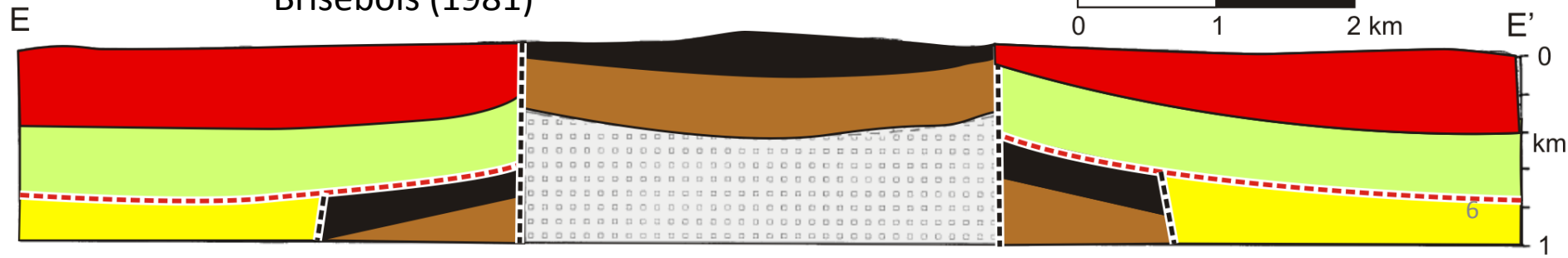
# Contexte géologique et hydrogéologique





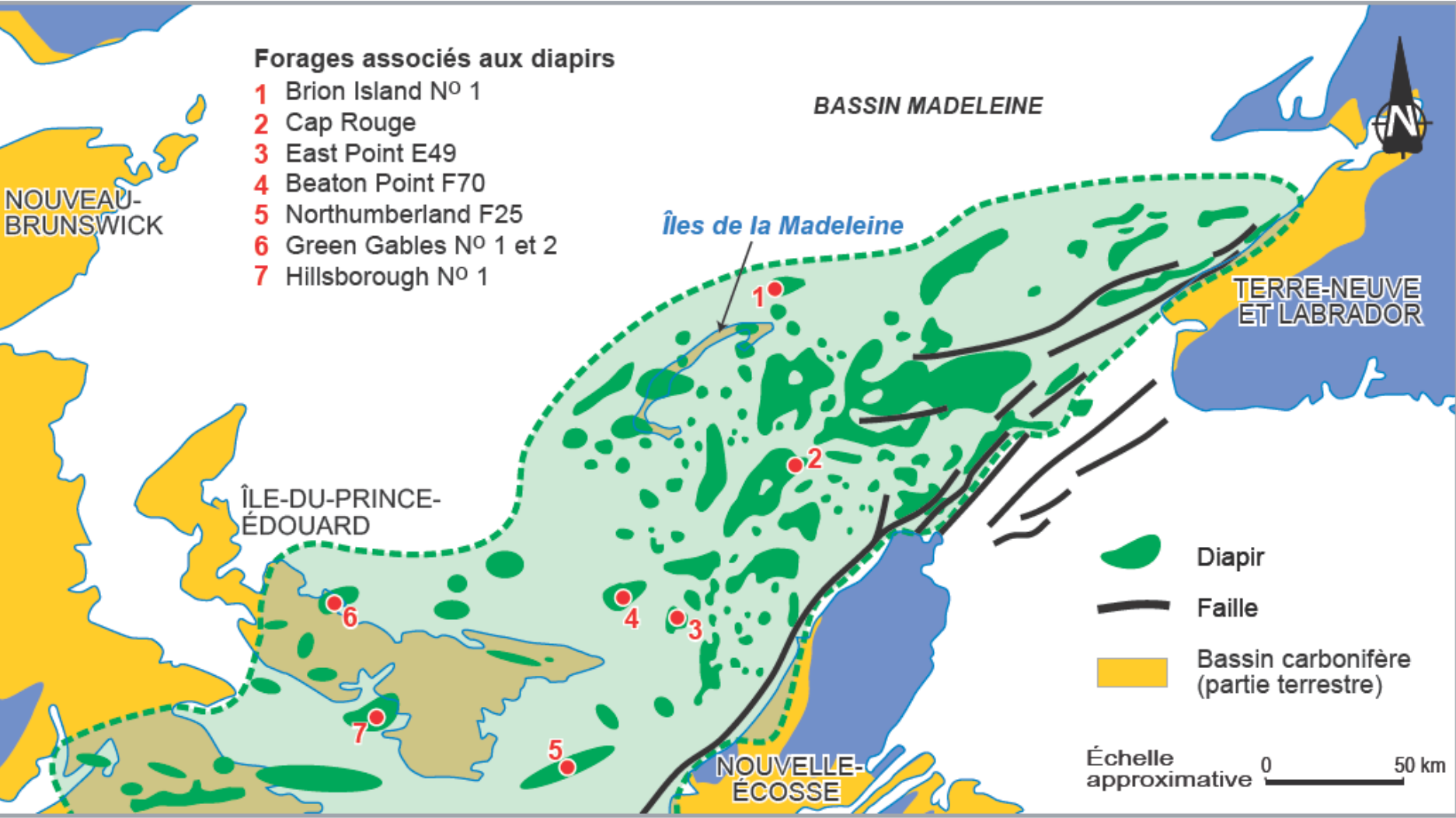
Modifié de  
Brisebois (1981)

Roche		Formation/Membre	
	Grès éoliens	Membre de l'Étang-des-Caps	Permien
	Grès, mudstones et conglomérat	Membre de l'Étang-du-Nord	
----- Discordance -----			
	Grès et siltstones	Formation de Cap au Diable	Carbonifère
	Grès, siltstones et mudstones		
	Roches volcaniques	Formation de Havre aux Maisons	
	Brèches d'effondrement		
	Terrigènes, calcaires et évaporites		
	Sel		





**BAPE. 2013.** *Les effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière. Rapport d'enquête et d'audience publique.*

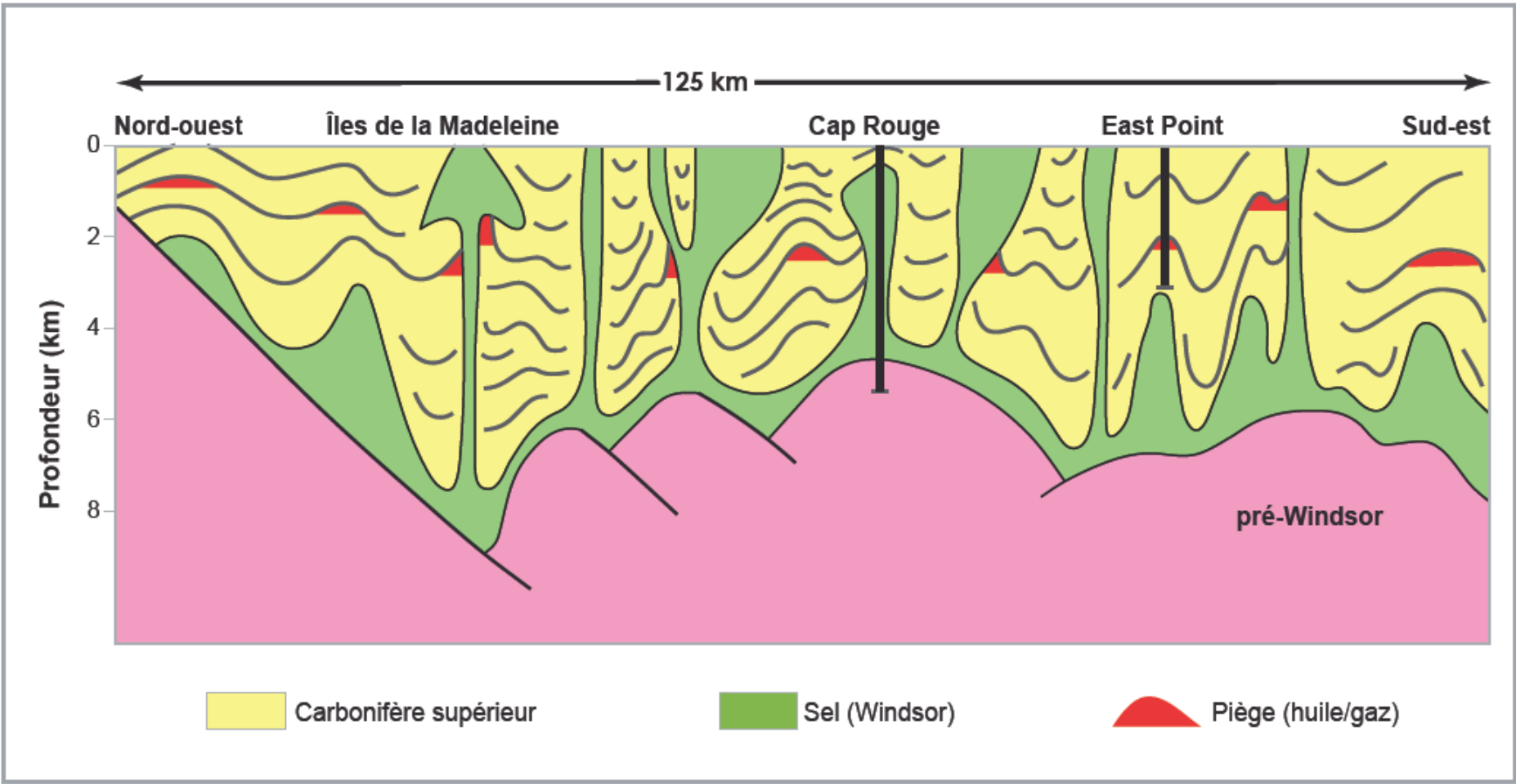


Source : adaptée de DB10, page 13.

**DB10** RESSOURCES NATURELLES CANADA. Commission géologique du Canada. Présentation sur la géologie et le potentiel en hydrocarbures des îles de la Madeleine effectuée le 15 mai 2013 par M. Nicolas Pinet, 6 pages.

**BAPE. 2013.** *Les effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière. Rapport d'enquête et d'audience publique.*

### Coupe géologique schématique



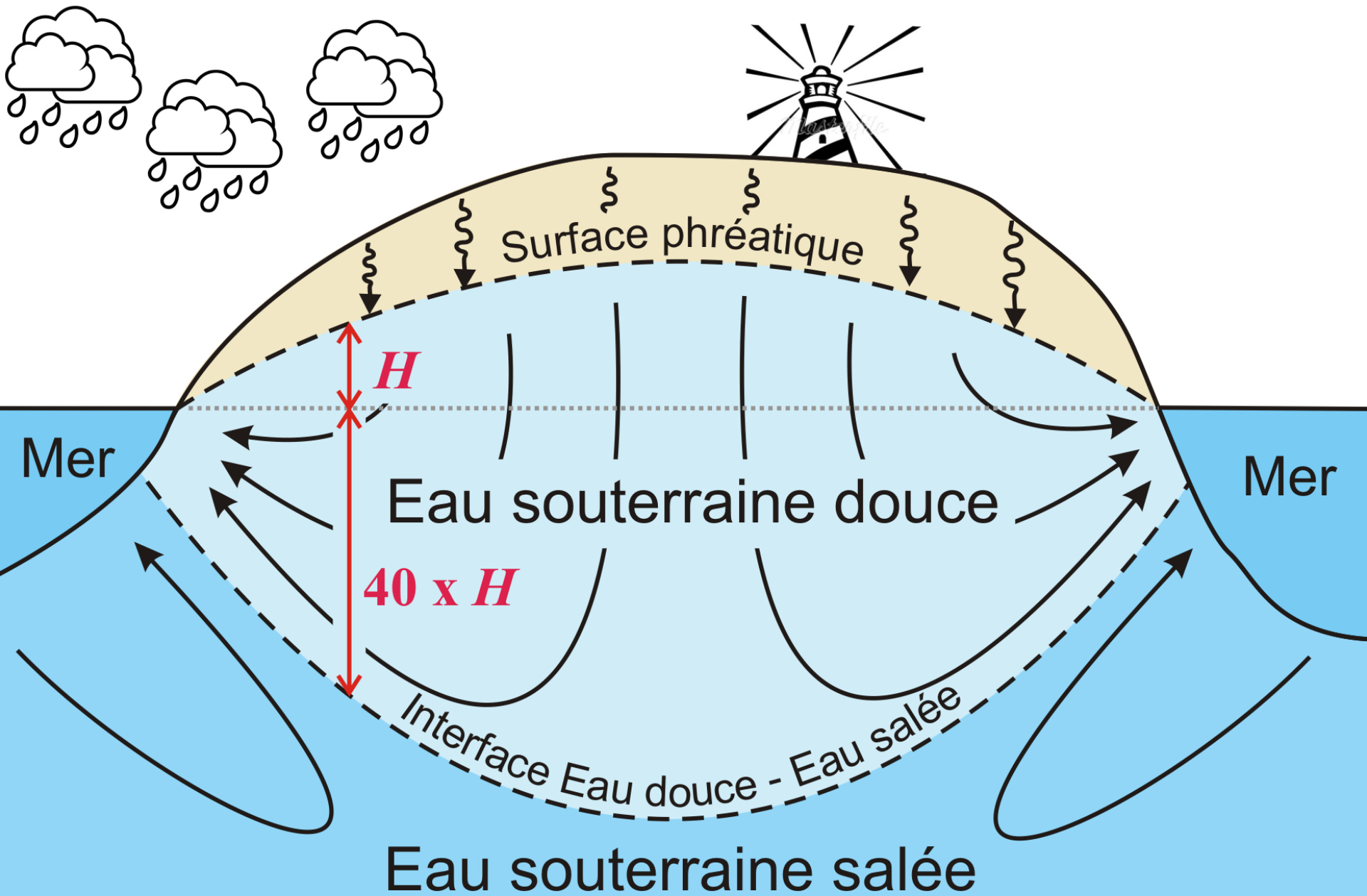
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Rapport 297

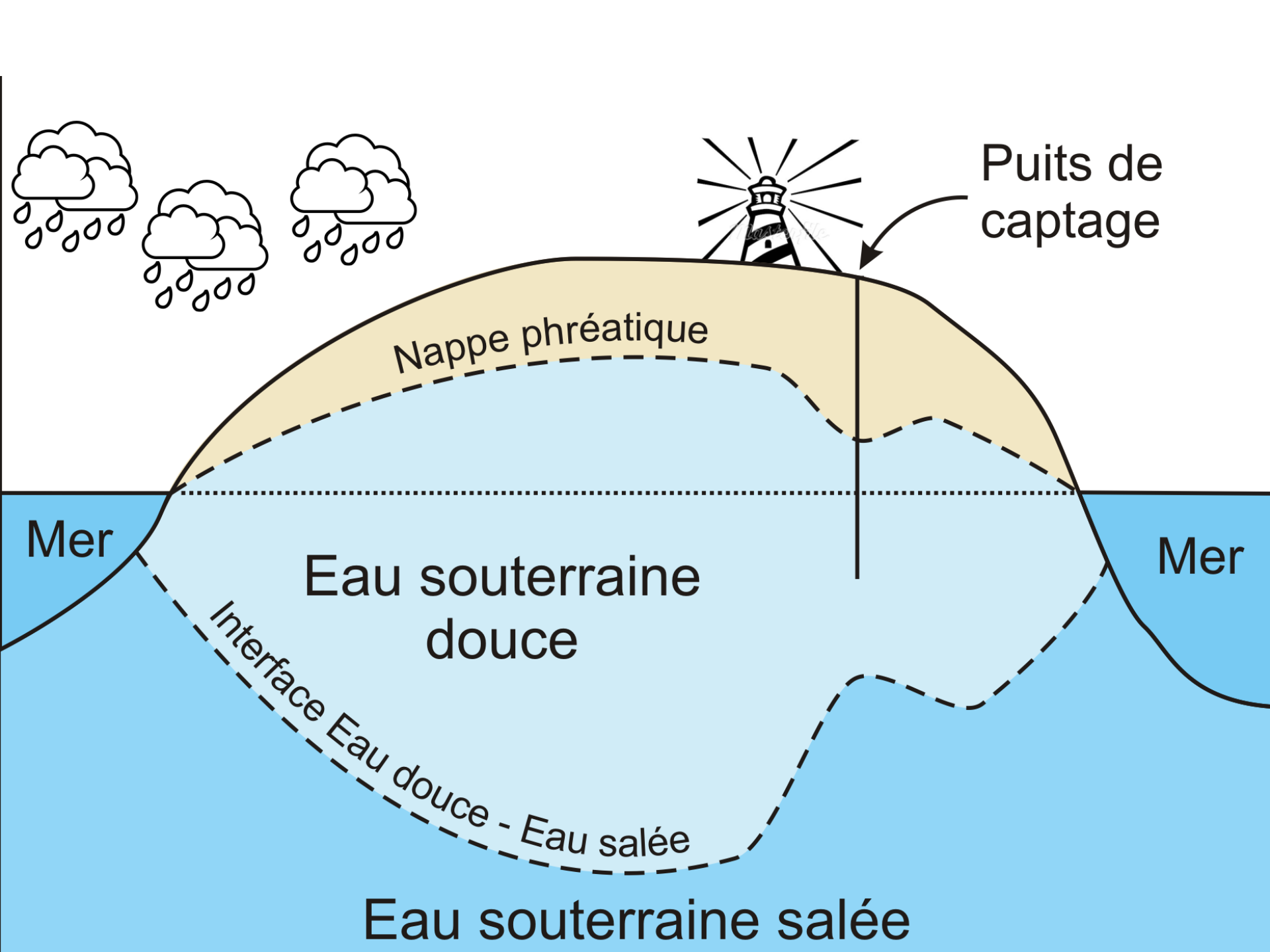
Source : adaptée de DB10, page 13.

**DB10**

RESSOURCES NATURELLES CANADA. Commission géologique du Canada. Présentation sur la géologie et le potentiel en hydrocarbures des îles de la Madeleine effectuée le 15 mai 2013 par M. Nicolas Pinet, 6 pages.







Puits de captage

Nappe phréatique

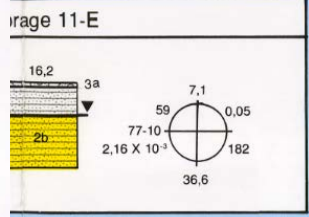
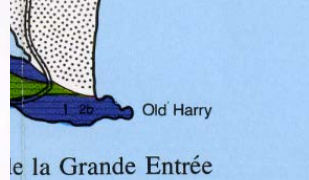
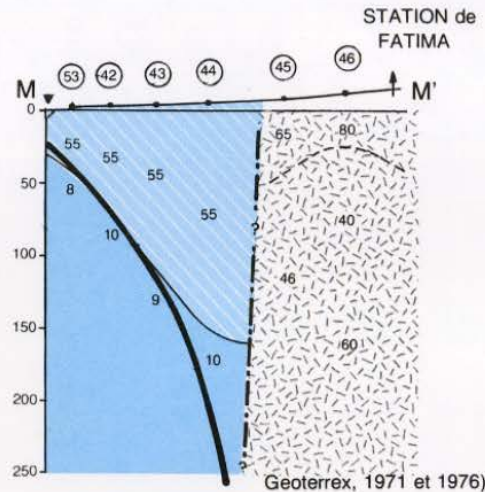
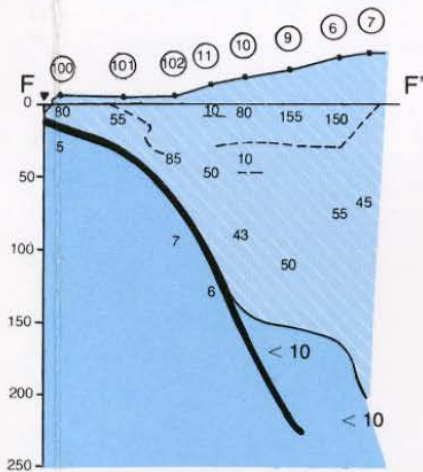
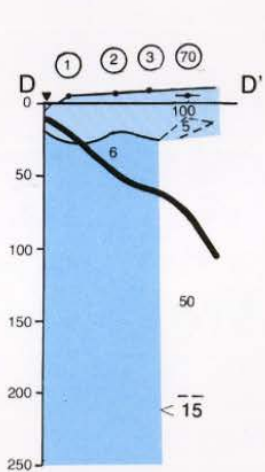
Mer

Eau souterraine douce

Mer

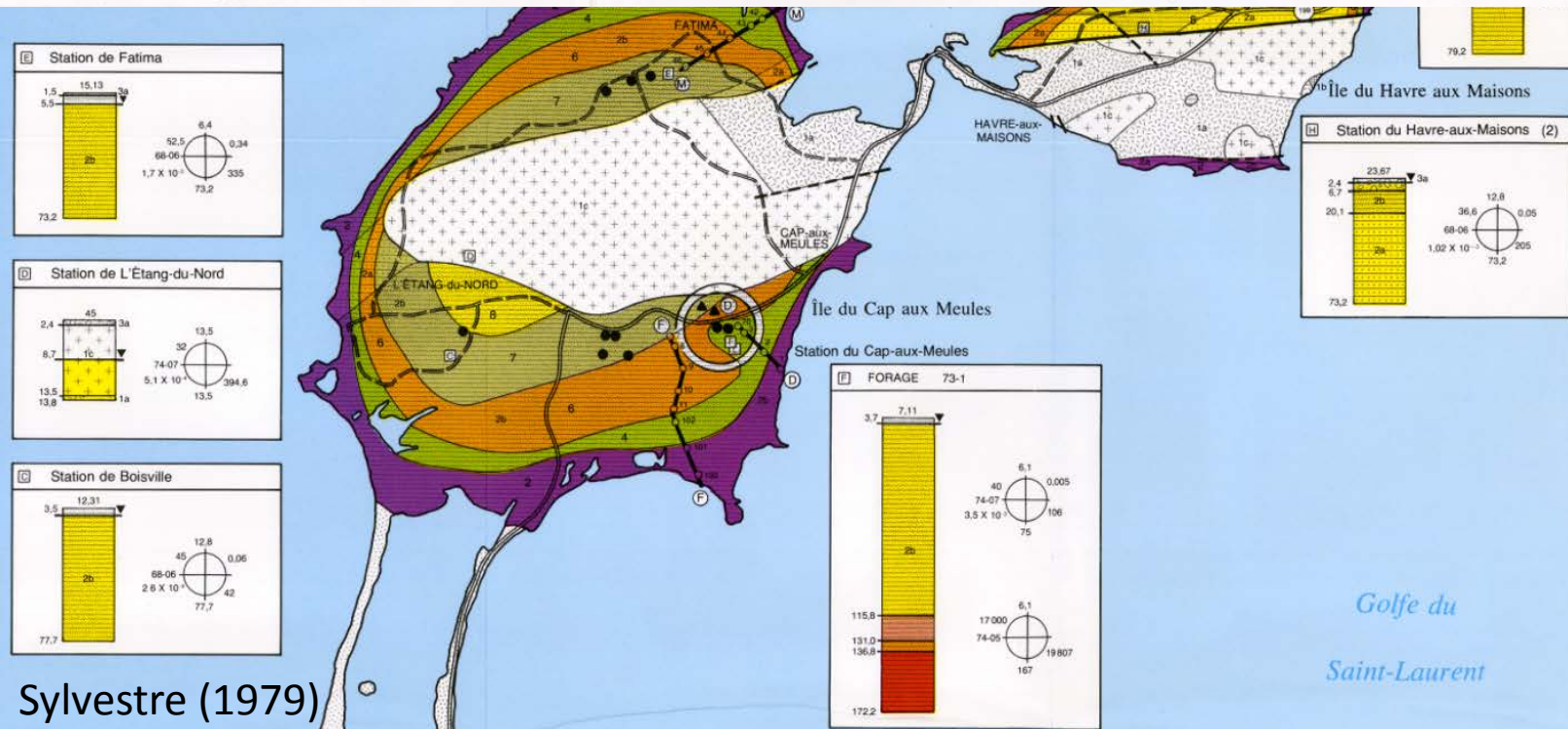
Interface Eau douce - Eau salée

Eau souterraine salée



- 55 Sondage électrique et son numéro
- 60 Résistivité (ohm-mètres)
- Changement lithologique présumé
- Indifférencié
- Argilites
- Basaltes
- Faïlle présumée
- Contact eau douce — eau salée (1971)
- Contact eau douce — eau salée (1976)
- Grès à eau douce
- Grès à eau salée

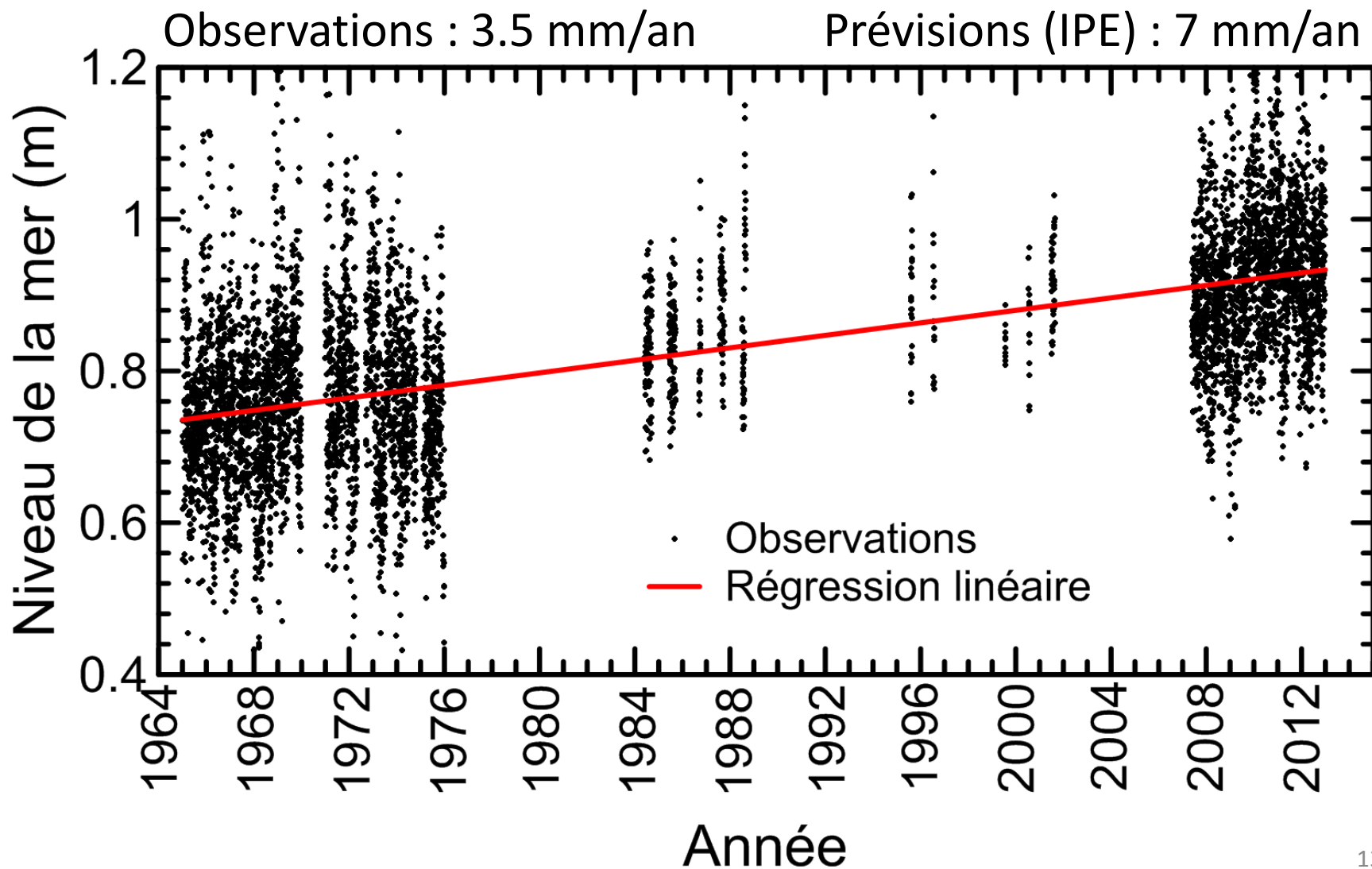
ZONE AQUIFÈRE	
Profondeur à l'eau salée en mètres	
1	<30
2	<60
3	<90
4	<120
5	<150
6	<245
7	<365
8	Indéterminée



Sylvestre (1979)

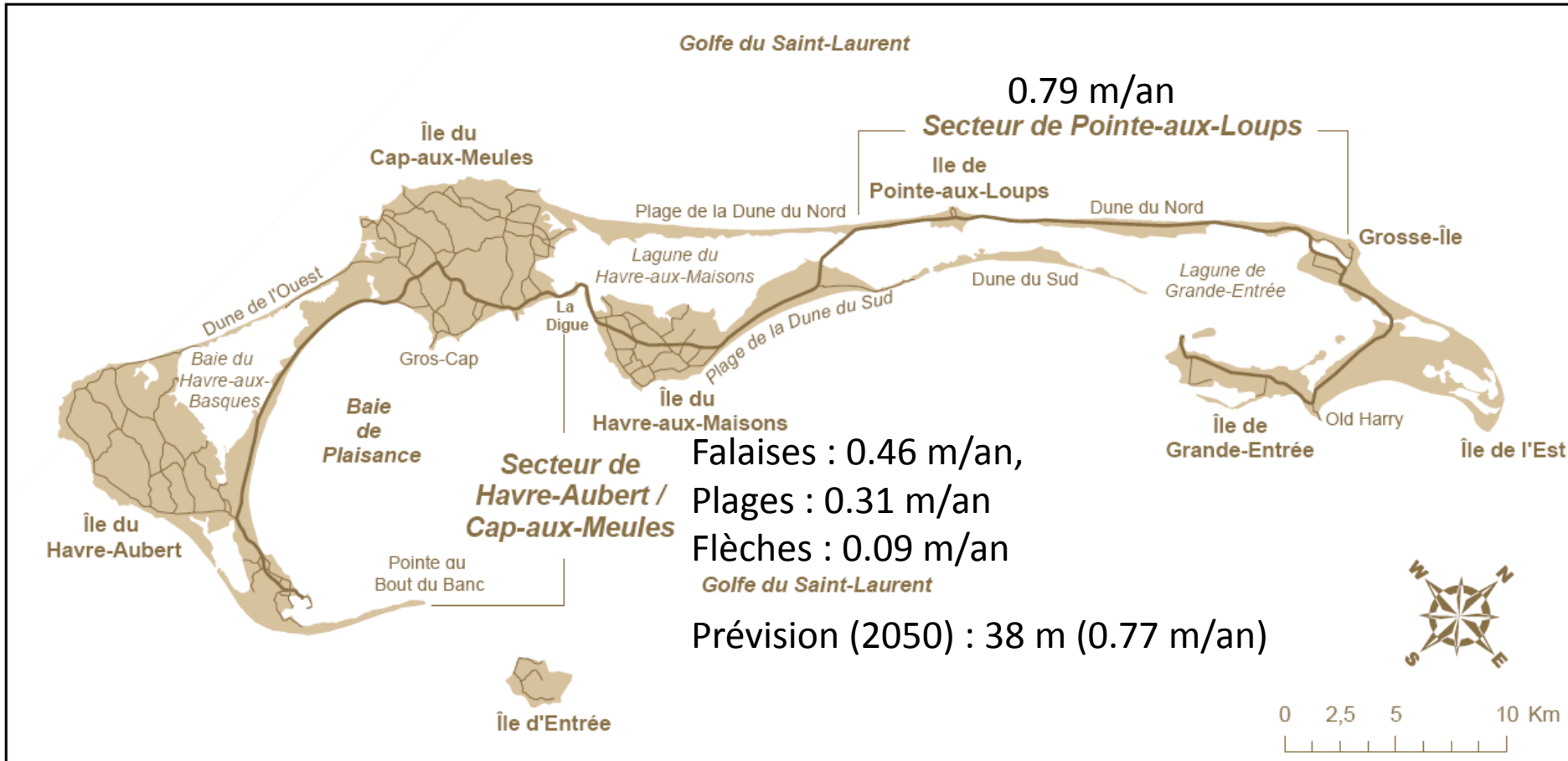
# Changements climatiques observés et anticipés

# Niveau (relatif) de la mer



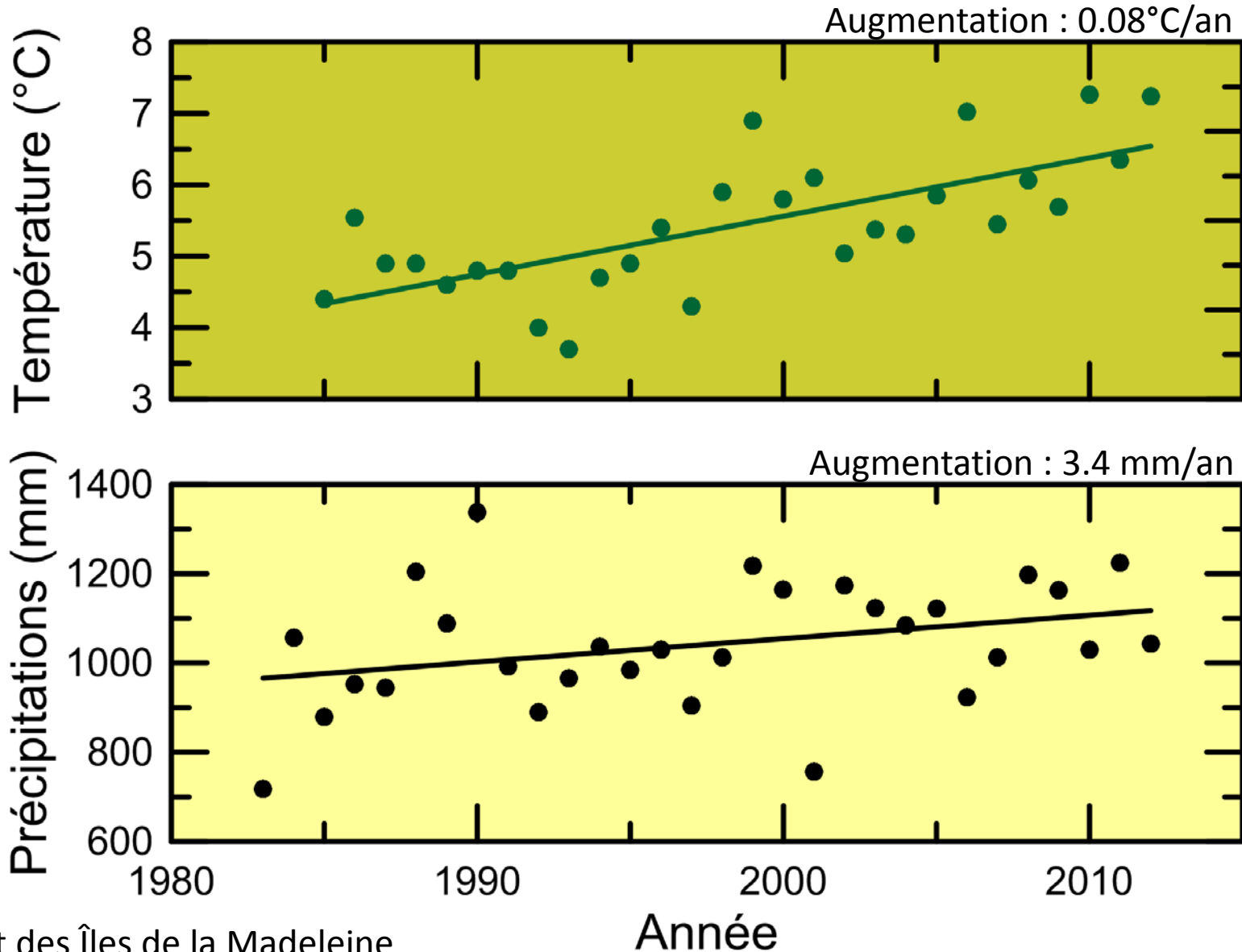
# Érosion

Bernatchez *et al.* (2008)





# Température et précipitations



# Scénarios climatiques

- Données et scénarios climatiques canadiens (<http://ccds-dscc.ec.gc.ca>)
- (24 GCMs – 2.5°×2.5°)

**Table 1.** The four scenario families of the Fourth IPCC Assessment Report with their respective global average surface warming projections to 2100 (IPCC, 2007).

	More economic focus	More environmental focus
<b>Globalisation</b>	<b>A1</b> Rapid economic growth (groups: A1T; A1B; A1FI) <b>1.4 - 6.4 °C</b>	<b>B1</b> Global environmental sustainability <b>1.1 - 2.9 °C</b>
<b>Regionalisation</b>	<b>A2</b> Regionally oriented economic development <b>2.0 - 5.4 °C</b>	<b>B2</b> Local environmental sustainability <b>1.4 - 3.8 °C</b>

# Prévisions 2040 (T, P)

Mois	$\bar{T}_{obs}$	$\Delta_T$			$\bar{T}_\Delta$ (°C)			$\bar{P}_{obs}$	$\Delta_p$			$\bar{P}_\Delta$ (mm/an)		
	°C	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1	mm/yr	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
Janvier	-5.8	1.33	1.04	1.56	-4.4	-4.7	-4.2	94	1.03	1.02	0.96	97	96	90
Février	-7.0	1.44	0.80	1.71	-5.6	-6.2	-5.3	72	1.06	1.05	1.03	76	75	74
Mars	-3.5	1.22	0.72	1.41	-2.3	-2.8	-2.1	77	1.06	1.03	1.01	81	79	77
Avril	1.6	0.86	0.52	1.03	2.5	2.1	2.6	74	1.04	1.01	0.98	77	74	72
Mai	7.2	0.80	0.47	0.93	8.0	7.7	8.1	83	1.04	1.04	1.02	86	86	84
Juin	12.5	0.80	0.48	0.96	13.3	13.0	13.5	77	1.04	1.03	1.03	80	79	79
Juillet	17.5	0.89	0.59	1.14	18.4	18.1	18.7	79	1.00	0.98	1.01	79	78	80
Août	18.1	1.02	0.69	1.17	19.2	18.8	19.3	87	1.02	0.99	1.00	89	86	87
Septembre	14.3	0.98	0.76	1.17	15.2	15.0	15.4	95	0.99	1.03	0.96	94	98	91
Octobre	8.7	0.94	0.74	1.22	9.6	9.4	9.9	105	0.98	1.01	0.94	102	106	98
Novembre	3.5	0.93	0.84	1.23	4.4	4.3	4.7	103	1.04	1.04	1.00	107	107	103
Décembre	-1.7	1.02	0.70	1.44	-0.7	-1.0	-0.3	107	1.04	1.04	1.00	112	111	107
<b>Total/moyenne</b>	5.4	1.02	0.70	1.25	6.5	6.1	6.79	1053	1.03	1.02	1.00	1081	1076	1046

# Évaluation de la recharge (2040)

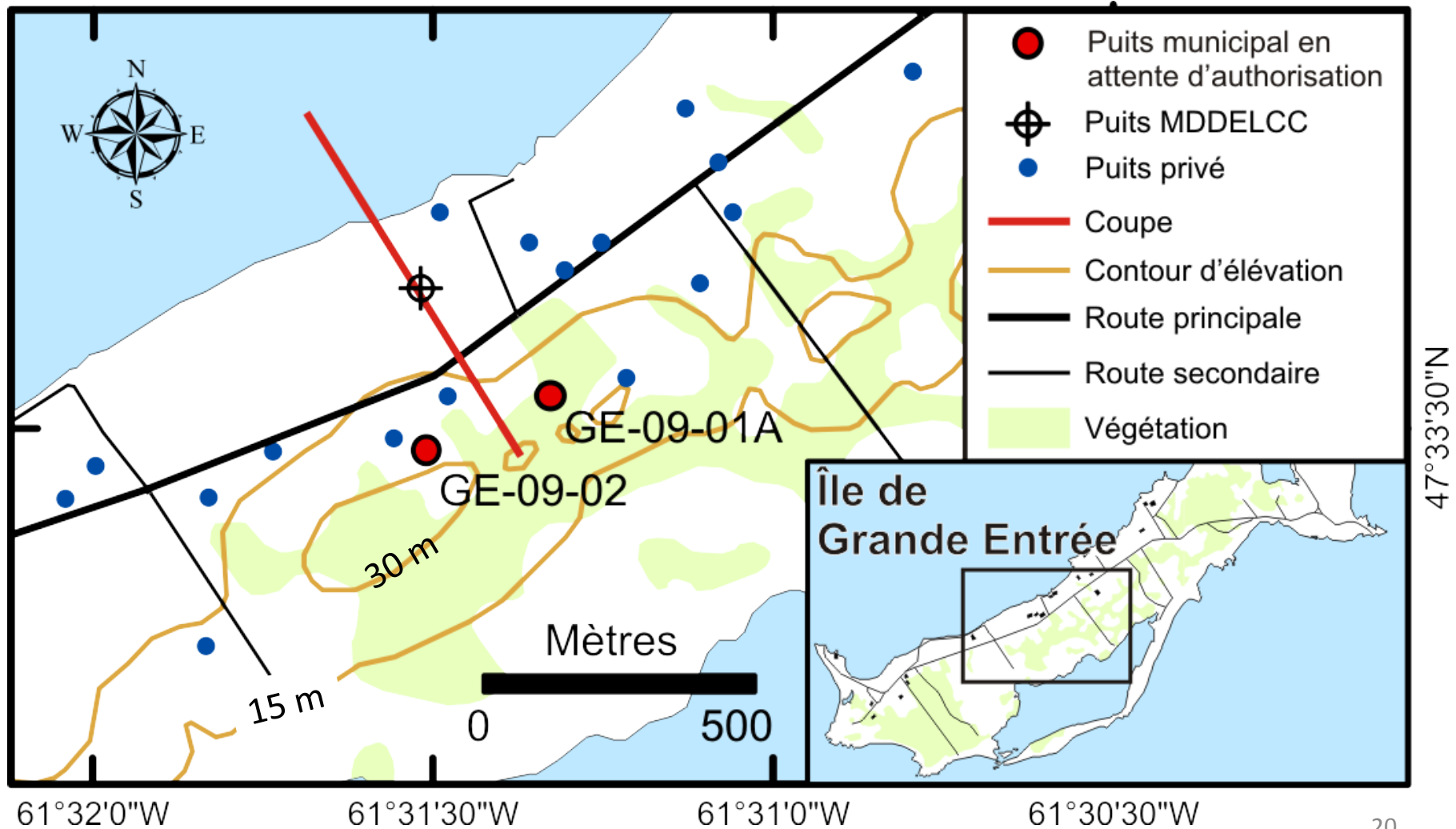
Méthode du bilan hydrologique (Thorntwaite et Mather, 1955).

$$P = ET + \Delta S + R$$

<b>Scénario</b>		<b><i>P</i></b> <i>mm/yr</i>	<b><i>R</i></b> <i>mm/yr</i>	<b><i>ET</i></b> <i>mm/yr</i>	<b><math>\Delta S</math></b> <i>mm/yr</i>
Période de contrôle		1053	421	422	209
A1B	$\Delta S_{min}$	1056	422	455	185
	$\Delta S_{moy}$	1081	432	422	229
	$\Delta S_{max}$	1159	464	435	263
A2	$\Delta S_{min}$	1020	408	410	208
	$\Delta S_{moy}$	1076	431	418	231
	$\Delta S_{max}$	1160	464	436	261
B1	$\Delta S_{min}$	789	316	336	151
	$\Delta S_{moy}$	1046	419	421	211
	$\Delta S_{max}$	1111	445	422	247

# Site d'étude

# Île de Grande Entrée





# Travaux de terrain Automne 2012

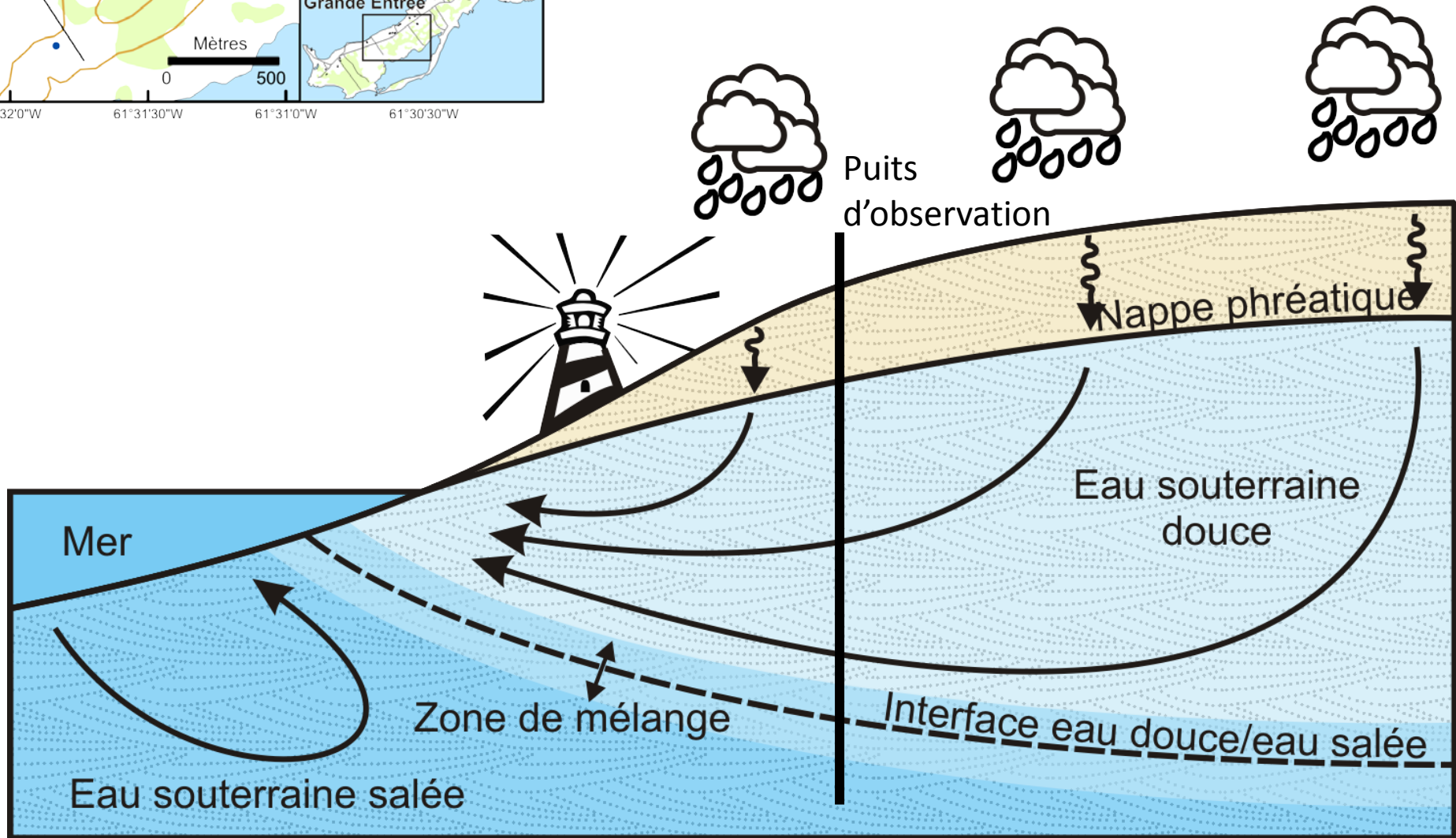
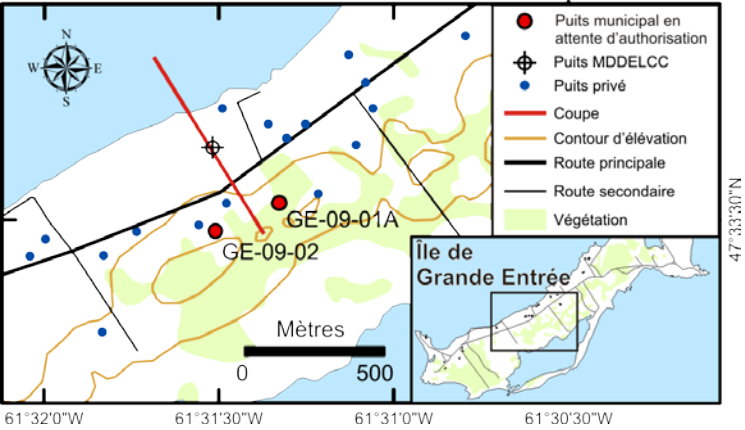


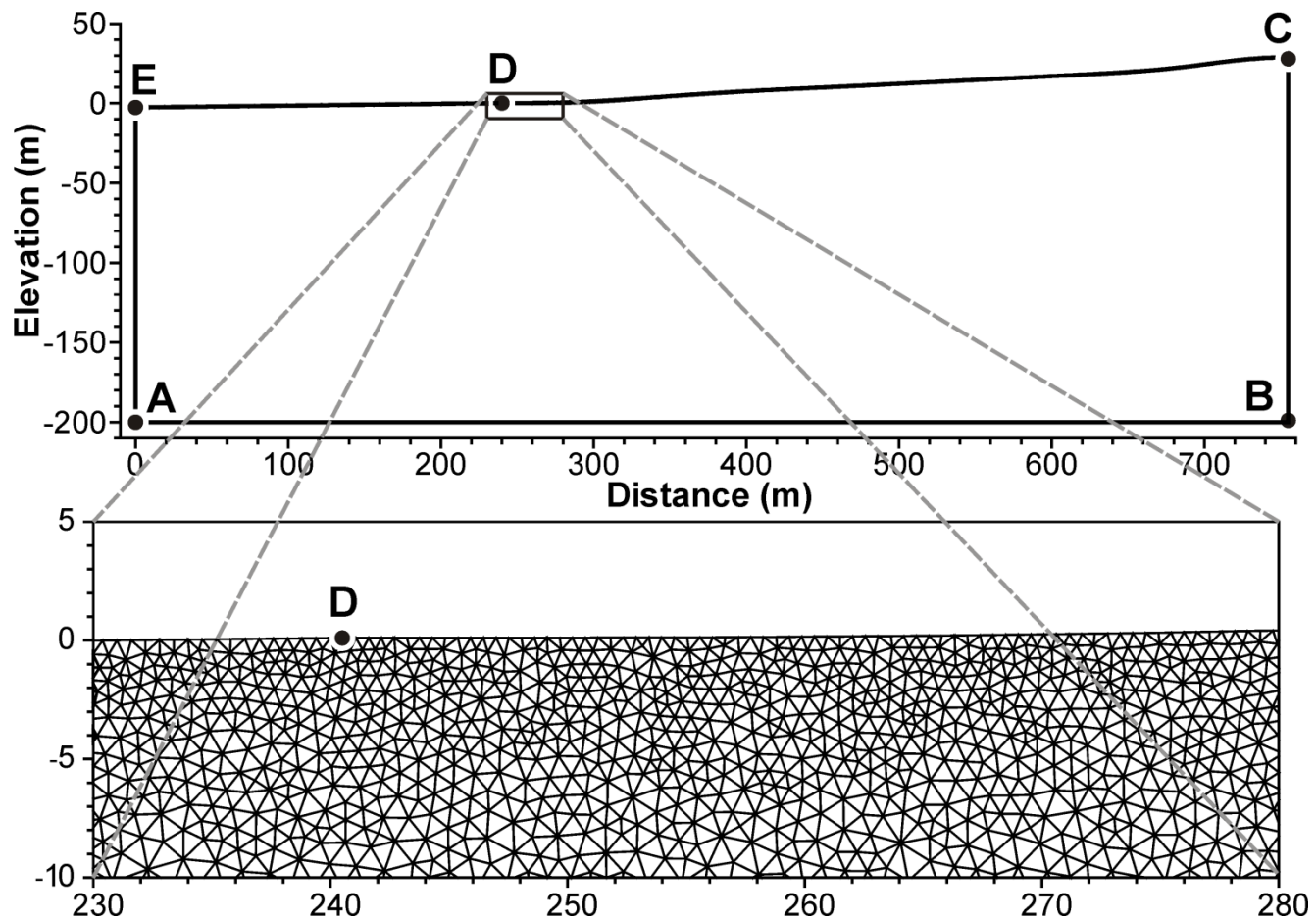




# Modèle numérique

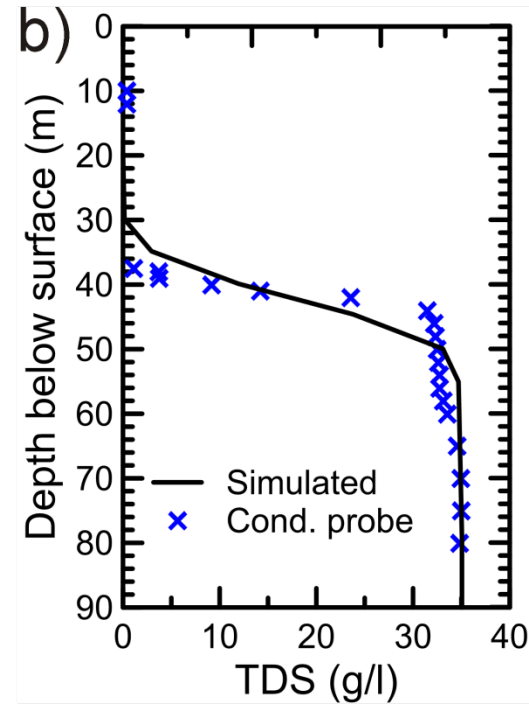
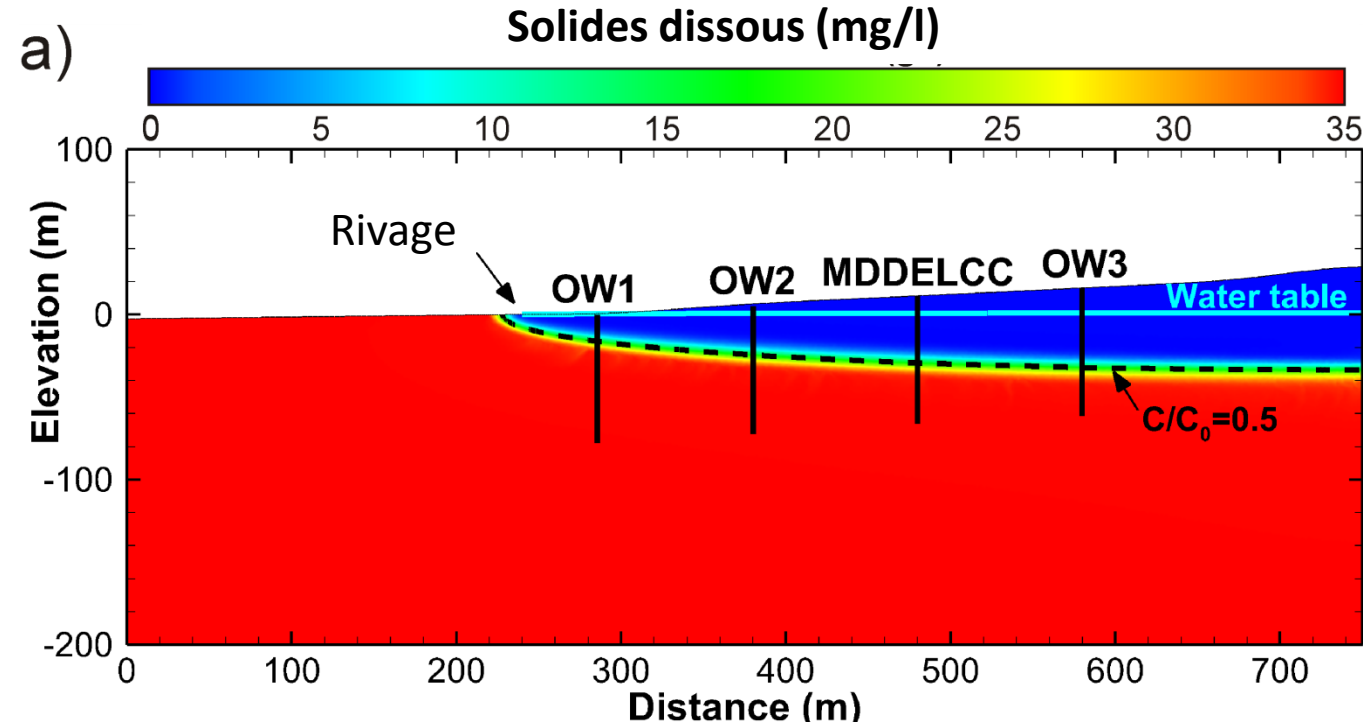
# Modèle conceptuel





Limites	Conditions aux frontières	
	Écoulement	Transport
Base du modèle (AB)	$q_n = 0$	$\nabla C = 0$
Limite de partage des eaux (BC)	$q_n = 0$	$\nabla C = 0$
Surface du sol (DC)	$q_n = 220 \text{ mm/y}$	$C = 0$
Limite marine latérale (AE)	$h_{sw} = 200.1 \text{ m}$	$C = 35 \text{ g/l}$
Fond marin (ED)		
si $q_n > 0$ (inflow)	$h_{sw} = 200.1 \text{ m}$	$C = 35 \text{ g/l}$
si $q_n < 0$ (outflow)	$h_{sw} = 200.1 \text{ m}$	$\nabla C = 0$

# Résultats (Conditions actuelles)



Paramètre	Valeur
Conductivité hydraulique (m/s)	
<i>Verticale</i>	$7 \times 10^{-5}$
<i>Horizontale</i>	$7 \times 10^{-6}$
Porosité (-)	0.30
Emmagasinement spécifique ( $m^{-1}$ )	$1 \times 10^{-4}$
Saturation résiduelle (-)	0.08

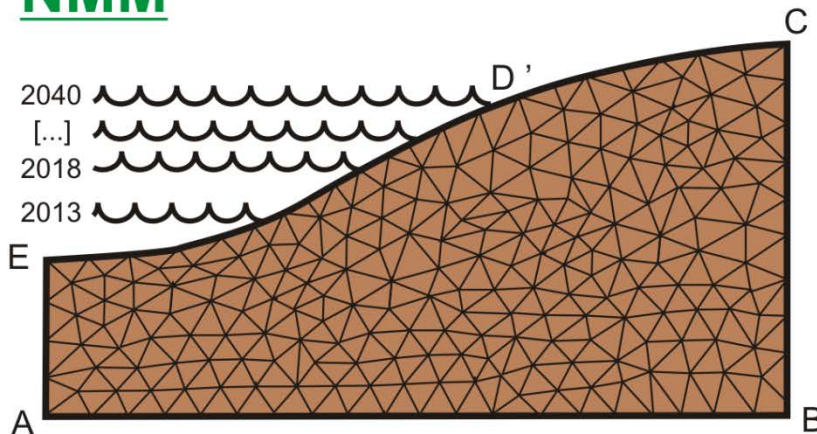
Paramètre	Valeur
Dispersion (m)	
<i>Longitudinale</i>	10
<i>Transverse</i>	0.08
Paramètres de Van-Genuchten	
$\alpha$ ( $m^{-1}$ )	0.7
<i>n</i> (-)	2.9



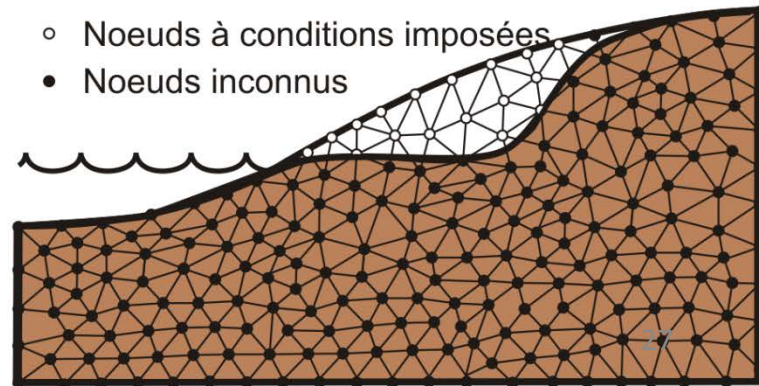
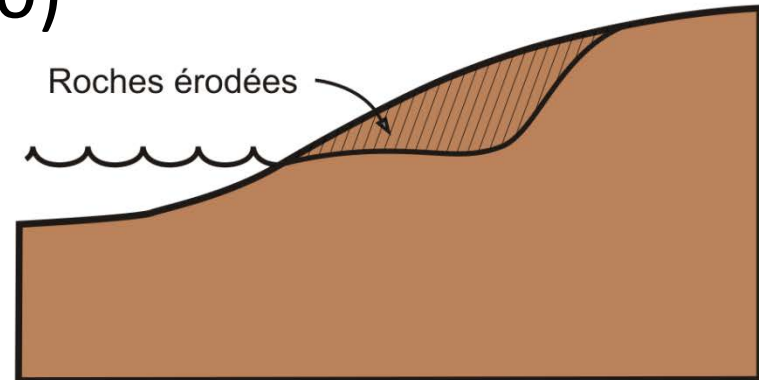
# Scénarios (2040)

- a) Augmentation du NNM : 7 mm/an (189 mm; 2040)
- b) Érosion : 0.77 m/an (20.79 m)
- c) Recharge : 141 mm/an (2040)
- d) Effets combinés

## Remontée du NMM

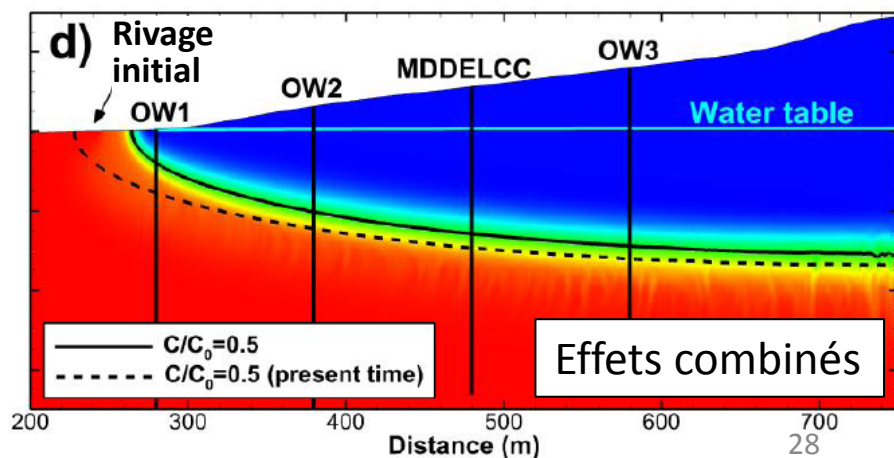
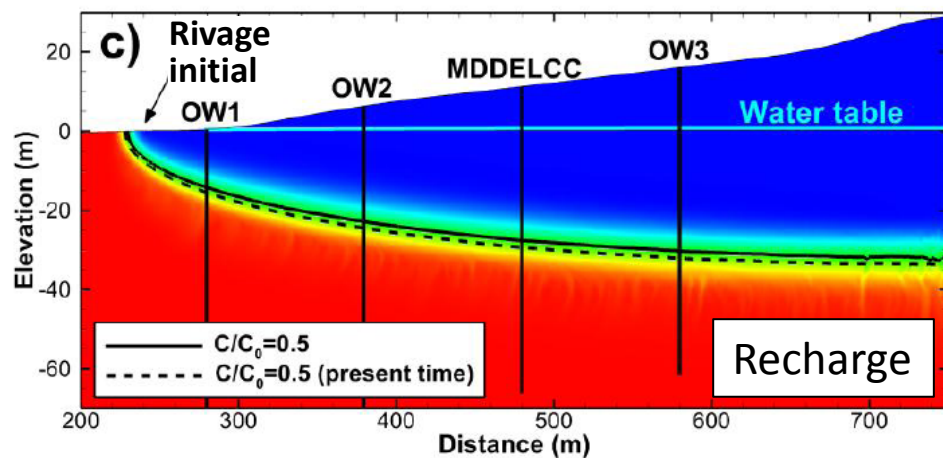
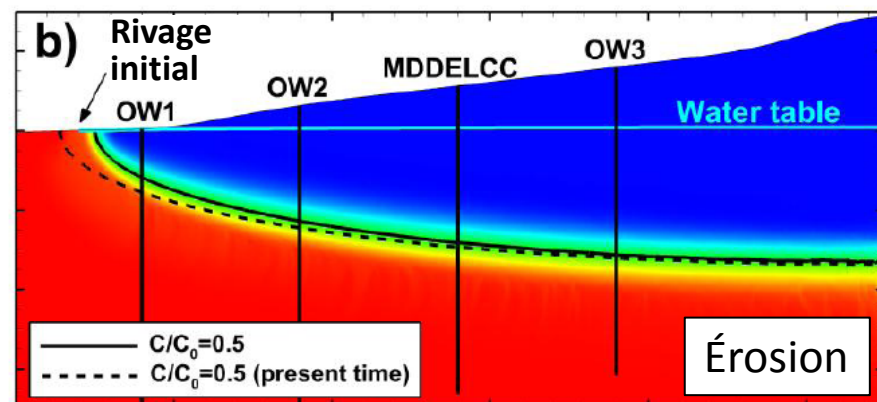
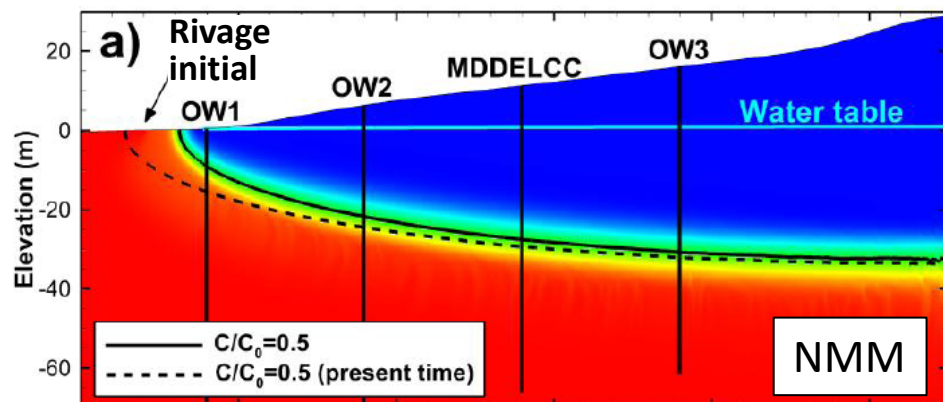


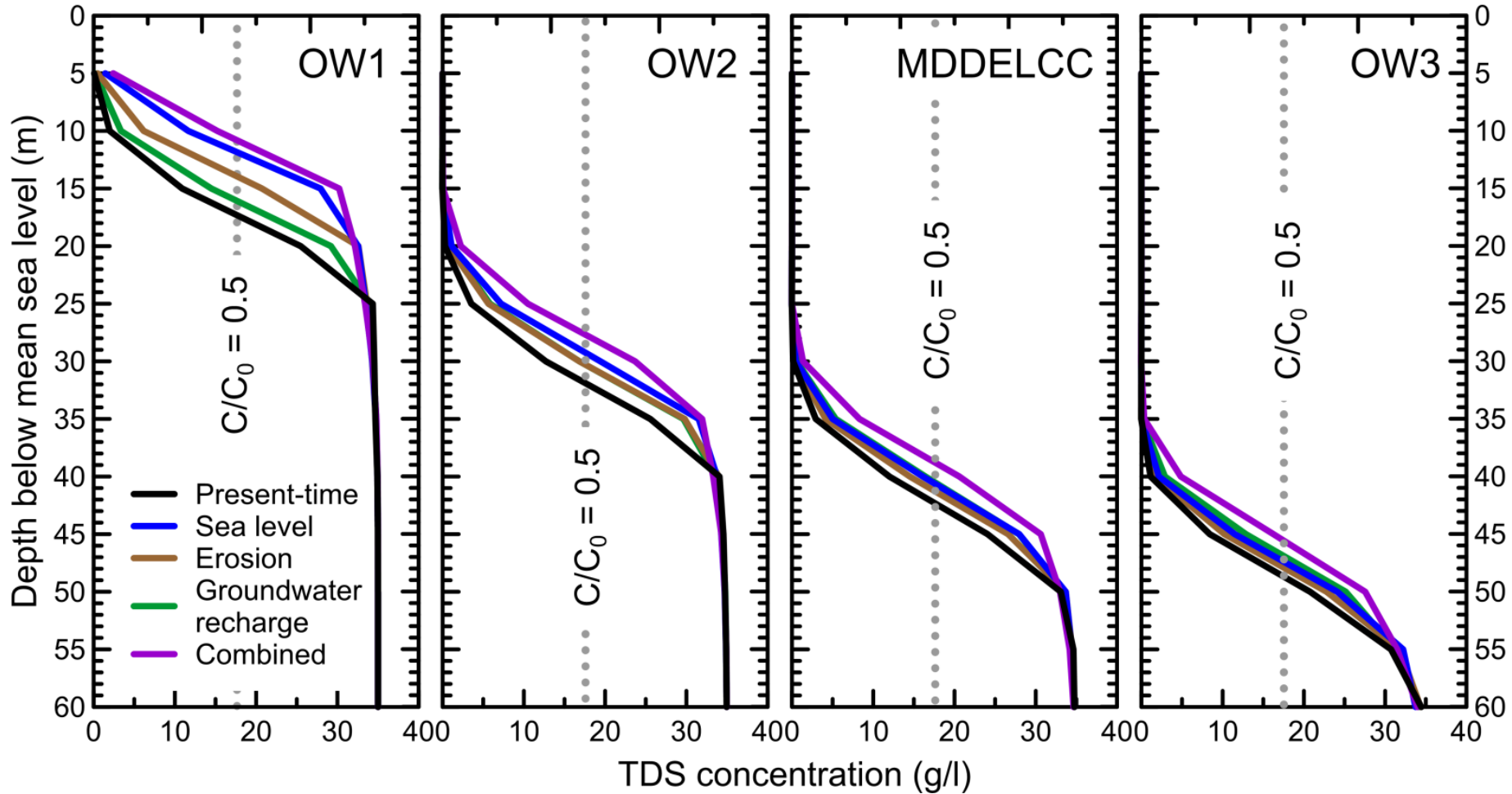
## Érosion



# Résultats -2040-

Solides dissous (mg/l)





Scenario	Interface elevation increase (m)			
	OW1	OW2	MDDELCC	OW3
Sea level rise	5.5	2.6	1.7	1.3
Erosion	3.4	1.6	1.0	0.8
Groundwater recharge	1.2	1.6	1.8	1.8
Combined	6.5	4.2	3.5	3.1
Sea-level rise (2100)	6.1	3.7	3.0	2.5
Groundwater recharge (2100)	3.3	4.5	5.3	5.7

# Conclusions

- Impacts plutôt faibles pour 2040 (remontée de l'interface de 3.1 à 6.5 m, et déplacement latéral de 35 m), mais important pour l'exploitation.
- Impact le plus important : Augmentation du niveau relatif de la mer. (Mais sur une période plus longue, la diminution de la recharge devient plus importante)
- Si les changements prennent fin en 2040, l'interface va continuer à remonter (jusqu'à 3x la valeur pour 2040) pendant encore au moins 60 ans.

# Implications pour le suivi de l'impact des changements climatiques

- Impact des changements climatiques faible
- Méthode de suivi recommandé : Puits d'observation (changements trop faibles pour le TDEM).
  - Conductivité électrique en puits ouvert (annuel)
  - Diagraphies géophysiques
  - État de base plusieurs mois après la fin des forages
  - Niveaux d'eau + capteurs de CE (variations saisonnières)
  - Position ~ 250 m de la côte.
- Utilisation du puits actuel non recommandée

# Remerciements

- Annick Petitpas
- Caroline Richard
- Benoit Boudreau
- Sébastien Moore
- Louis Ricard



Municipalité des  
Îles-de-la-Madeleine

*Développement durable,  
Environnement et Lutte  
contre les changements  
climatiques*

Québec 

- Nelly Montcoudiol



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

# Mise à l'échelle: Méthode des deltas

$$\bar{P}_{\Delta}(i) = \Delta_p(i) \times \bar{P}_{obs}(i) \quad i = 1, \dots, 12$$

$$\Delta_p(i) = \frac{\bar{P}_{scen}(i)}{\bar{P}_{cont}(i)} \quad i = 1, \dots, 12$$

$\bar{P}_{\Delta}$  Précipitations moyennes mises à l'échelle pour la période visée par le scénario (2013-2040)

$\Delta_p$  Facteur delta

$\bar{P}_{obs}$  Précipitations moyennes observées (1985-2012)

$\bar{P}_{scen}$  Précipitations moyennes simulées pour la période visée par le scénario (2013-2040)

$\bar{P}_{cont}$  Précipitations moyennes simulées pour la période de contrôle par les GCMs (1985-2012)

$i$  Mois de l'année



# Mise à l'échelle: Méthode des deltas

$$\bar{T}_{\Delta}(i) = \bar{T}_{obs}(i) + \Delta_T(i) \quad i = 1, \dots, 12$$

$$\Delta_T(i) = \bar{T}_{scen}(i) - T_{cont}(i) \quad i = 1, \dots, 12$$

$\bar{T}_{\Delta}$       Température moyenne mise à l'échelle pour la période visée par le scénario (2013-2040)

$\Delta_T$       Facteur delta

$\bar{T}_{obs}$       Température moyenne observée (1985-2012)

$\bar{T}_{scen}$       Température moyenne simulée pour la période visée par le scénario (2013-2040)

$\bar{T}_{cont}$       Température moyenne simulée pour la période de contrôle par les GCMs (1985-2012)

$i$       Mois de l'année