

Chapitre 2

PORTRAIT GÉOGRAPHIQUE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

Audrey M. Rémillard, Maud Touchette, Gwénaëlle Chaillou et Bernard Hétu

Chapitre 2 TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 2 PORTRAIT GÉOGRAPHIQUE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE	28
2.1 PORTRAIT PHYSIQUE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE	30
2.1.1 Géologie régionale	31
2.1.2 Lithostratigraphie des Îles-de-la-Madeleine.....	33
2.1.3 Dépôts meubles du Quaternaire	38
2.1.4 Le sol.....	41
2.2 PORTRAIT HUMAIN DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE	44
2.3 LES PRESSIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES QUI S'EXERCENT SUR LA RESSOURCE EN EAU ET SCÉNARIOS FUTURS	49
2.3.1 Les pressions naturelles.....	49
2.3.2 Les pressions anthropiques.....	54
FAITS SAILLANTS.....	60
2.4 RÉFÉRENCES	62

« *La terre est une mère, elle vit, elle respire, elle se nourrit* »

Pierre Rabhi

La géologie joue un rôle primordial dans toutes les phases d'exécution d'un programme de mise en valeur des ressources en eau (Castany, 1998). La lithologie des terrains, les structures géologiques, les dépôts **quaternaires**, le développement du sol et l'occupation du territoire sont autant de facteurs qui conditionnent le ruissellement de surface, l'alimentation et la décharge des nappes, la constitution et le renouvellement des réserves en eau souterraine et, enfin, les possibilités d'emplacement et d'exécution d'ouvrages hydrauliques (Castany, 1998).

Les activités anthropiques ainsi que les variabilités et les changements climatiques sont des agents de stress à considérer dans le cycle hydrologique, particulièrement en ce qui a trait aux eaux souterraines. L'extraction des ressources non renouvelables, comme les minéraux, les agrégats ou encore les hydrocarbures, est nécessaire pour nos activités actuelles. Cependant, tout comme les activités agricoles ou l'exploitation à des fins de consommation, ces extractions peuvent avoir un effet sur la ressource en eau souterraine, aussi bien sur sa quantité que sur sa qualité (Ptacek *et al.*, 2004). Les changements climatiques sont aussi à considérer comme un stress supplémentaire qui peut exacerber les risques de pénurie et de **contamination** (Rivera *et al.*, 2004; IPCC, 2007).

Dans ce chapitre, nous dressons un portrait géographique des Îles-de-la-Madeleine en nous intéressant, dans un premier temps, au contexte géologique et à la couverture des sédiments quaternaires et des sols. Nous portons un regard particulier sur l'occupation actuelle des sols et l'urbanisation qui influencent la répartition des prélèvements d'eau et la qualité de la ressource. Dans un deuxième temps, nous présentons les facteurs de stress présents aux Îles-de-la-Madeleine, *c.-à-d.* d'une part les pressions anthropiques qui sont liées à l'exploitation de la nappe ou encore les activités susceptibles d'altérer la ressource, et d'autre part les pressions naturelles qui s'exercent sur le milieu.

2.1 PORTRAIT PHYSIQUE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

La distribution actuelle de l'eau douce, **saumâtre** et salée dans le sous-sol s'est développée au cours de l'histoire géologique. La pétrologie, la sédimentologie, l'analyse structurale et la

géochimie des corps sédimentaires mis en place au cours des temps géologiques déterminent les caractéristiques physiques et chimiques, c'est-à-dire. la structure des réservoirs. La granulométrie ainsi que la fissuration et la présence de failles contrôlent l'écoulement et l'hydrodynamique de ceux-ci.

2.1.1 Géologie régionale

Les Îles-de-la-Madeleine appartiennent à la province géologique des Appalaches. L'archipel est situé au cœur du bassin des Maritimes, à l'intérieur d'un grand **bassin sédimentaire** datant du **Carbonifère** (cf. tableau 2.1). Ce bassin occupe la moitié sud du golfe du Saint-Laurent ainsi qu'une partie des provinces maritimes. Il comprend également une mince portion de la bordure méridionale de la Gaspésie (Brisebois, 1981; La Flèche *et al.*, 1998; Maillet, 1992) (Figure 2.1). Long d'approximativement 900 km et large de 300 à 400 km, le bassin des Maritimes s'étire suivant un axe sud-ouest – nord-est, de la Baie de Fundy jusqu'à White Bay à Terre-Neuve (La Flèche *et al.*, 1998) (figure 2.1). Selon Brisebois (1981), l'étendue totale de ce bassin est inconnue.

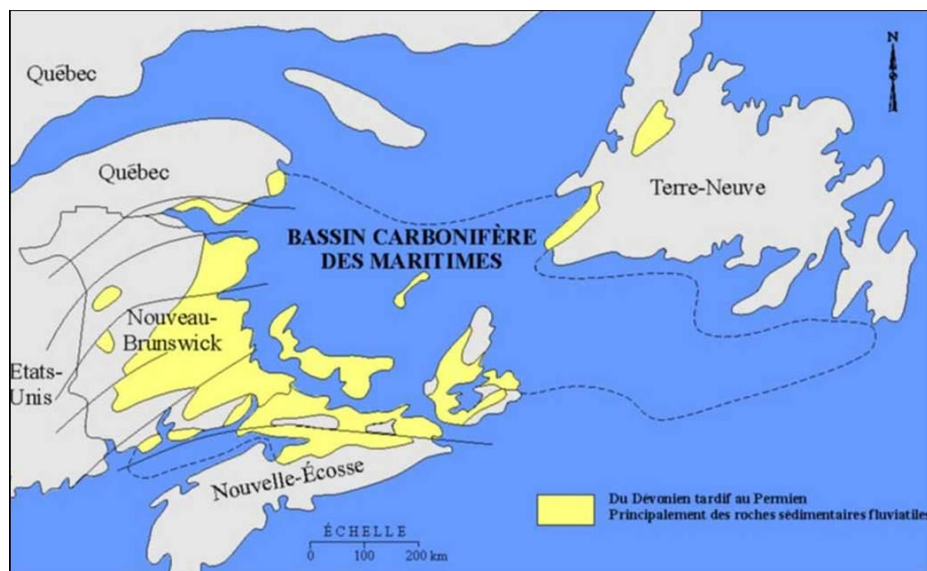


Figure 2. 1. Localisation et extension du bassin des Maritimes au cœur du golfe du Saint-Laurent et étendue des sédiments carbonifères (tirée de Ministère de l'Énergie et des mines Nouveau-Brunswick, 2012).

Tableau 2. 1. Nomenclatures géologiques et stratigraphiques des principales unités permo-carbonifères des Îles-de-la-Madeleine et âges associés (modifié de Brisebois, 1981).

Époque	Étages	Âge (Ma)	Unités stratigraphiques		
Permien (inférieur)	295 – 258		Formation de Cap-aux-Meules	Membre de l'Étang-des-Caps	
				Membre de l'Étang-du-Nord	
Carbonifère	Pennsylvanien	325 – 295	Lacune (discordance)		
			Gzhelien	Groupe de Windsor	
			Kasimovien		
			Moscovien		
	Bashkirien				
	Mississippien	360 – 325	Formation du Cap-au-Diable		
			Serpukhovien	Lacune (discordance)	
Viséen					
Tournaisien					
Dévonien	410 - 360				

Il existe plusieurs types de bassins sédimentaires. Celui des Maritimes est un bassin de rift (Brisebois, 1981), *c.-à-d.* qu'il s'est formé dans une zone en extension de la croûte terrestre (Allègre & Dars, 2009; Marshak, 2010). Il correspond à un ancien rift, nommé bassin de Fundy, actif de la fin du **Dévonien** au début du **Permien** (*cf.* tableau 1), donc après la formation des Appalaches (Brisebois, 1981; La Flèche *et al.*, 1998). Le bassin des Maritimes correspond donc à un immense **graben** délimité par des failles majeures le séparant des plates-formes adjacentes (Brisebois, 1981) (figure 2.2). Les roches sédimentaires qui s'y sont accumulées reposent en **discordance** sur le socle appalachien (La Flèche *et al.*, 1998).

Tout au long de la phase extensive du rift, le bassin des Maritimes a été colmaté par des sédiments terrigènes d'origines fluviale, lacustre, marécageux et éolien – sous l'effet de conditions climatiques changeantes. Ces séquences ont été interrompues par des incursions marines au Viséen (tableau 2.1) (Brisebois, 1981). Ces transgressions marines peu profondes ont favorisé la mise en place de volumineux dépôts d'évaporites (Brisebois, 1981; Maillet, 1992). Les évaporites désignent des dépôts riches en sels qui se sont concentrés puis ont précipités en raison d'une évaporation intense sous un climat chaud et sec (Foucault & Raoult, 2010).

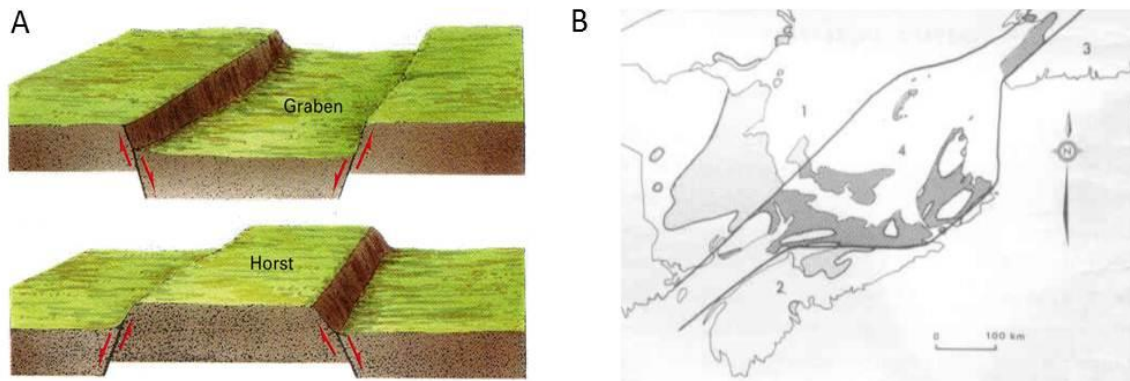


Figure 2. 2A) Illustration schématique d'un graben et d'un horst (tirée de Strahler & Strahler, 2005), et B) localisation et configuration du rift (bassin de Fundy) actif de la fin du Dévonien au début du Permien (tirée de Brisebois, 1981).

De la fin du Dévonien jusqu'au Carbonifère inférieur, la région a été affectée par de nombreuses éruptions volcaniques (La Flèche *et al.*, 1998). Les séquences continentales et marines sont donc interstratifiées avec des roches d'origine volcanique (La Flèche *et al.*, 1998) disséminées dans l'ensemble du bassin à la suite d'épanchements restreints, sauf aux Îles-de-la-Madeleine où il y a une séquence volcanique d'environ 150 m d'épaisseur (Brisebois, 1981).

Au début du Permien, les dépôts d'évaporites ont migré vers la surface par **diapirisme** en raison de leur faible densité, provoquant ainsi des déformations structurales majeures dans les roches encaissantes (Barr *et al.*, 1985) (figure 2.3). Les dômes de sels près, des Îles-de-la-Madeleine, peuvent atteindre ~ 5 km d'épaisseur (Howie & Barss, 1975). Certains de ces dômes sont d'ailleurs exploités (Mines Seleine, *cf.* Chapitre 4). L'archipel madelinot a donc été soulevé par le diapirisme dont la période d'activité s'est étendue de la fin du Carbonifère au début du Permien (Brisebois, 1981). En plus de l'ajustement isostatique, l'archipel connaît encore, selon Dredge *et al.* (1992), un relèvement très lent en raison de cette tectonique saline. Toutefois, cette affirmation n'est pas supportée par les données récentes sur l'évolution du niveau marin relatif. Ces données témoignent plutôt d'une **subsidence** qui dure depuis plusieurs siècles, voire davantage (Juneau, 2012).

2.1.2 Lithostratigraphie des Îles-de-la-Madeleine

Le bassin des Maritimes est caractérisé par de nombreuses failles et par une série de grabens formant des sous-bassins (Brisebois, 1981). Le bassin des Îles-de-la-Madeleine est le plus grand sous-bassin du bassin des Maritimes avec une superficie de ~ 25 000 km² autour des Îles.

L'archipel est situé approximativement au centre de ce bassin (La Flèche *et al.*, 1998) qui est presque entièrement submergé par le golfe du Saint-Laurent, à l'exception des Îles.

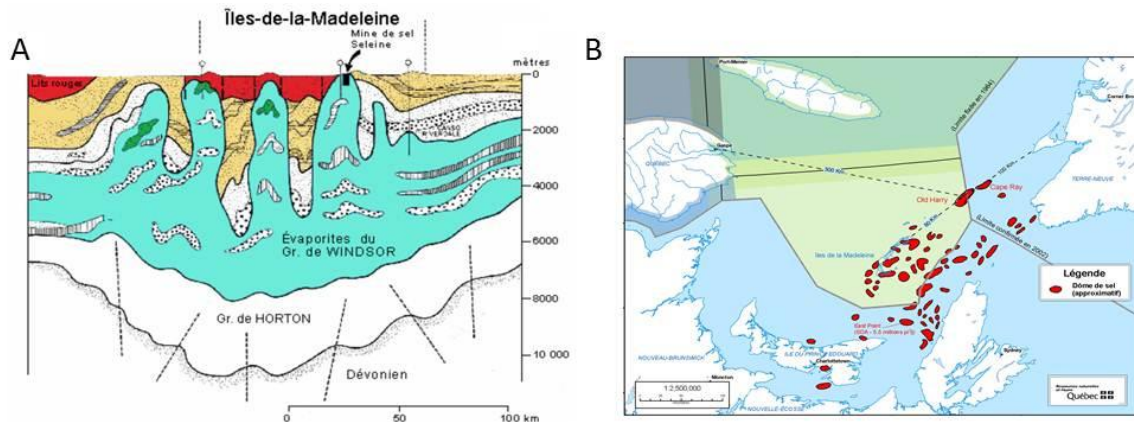


Figure 2. 3. A) Dépôts d'évaporites datant du Viséen situés sous les Îles-de-la-Madeleine et remontant vers la surface (tiré d'Université LAVAL, 2012 (a)), et B) Localisation des dômes de sel dans le bassin des Îles-de-la-Madeleine (Source : MRNF).

Les unités stratigraphiques permo-carbonifères des Îles-de-la-Madeleine sont regroupées en deux assemblages principaux : le Groupe de Windsor et la Formation du Cap-aux-Meules (Brisebois, 1981; Maillet, 1992) (tableau 2.1). Datant du Viséen, le Groupe de Windsor comprend la Formation du Havre-aux-Maisons à la base et la Formation du Cap-au-Diable au sommet. La Formation de Cap-aux-Meules, datant du Permien inférieur, repose en discordance sur le Groupe de Windsor. Entre ces deux assemblages, il y a une lacune de sédimentation – ou discordance – d'environ 50 millions d'années.

La Formation du Havre-aux-Maisons est à la base de la séquence stratigraphique observable sur l'archipel. Elle est composée en grande partie d'argilites (60 %), de grès à grain fin, de roches volcaniques et volcanoclastiques, de calcaire et de gypse. Toutes les roches de la formation constituent un ensemble très fracturé et présentant un aspect chaotique. La Formation du Havre-aux-Maisons est remplacée graduellement par la Formation du Cap-au-Diable, constituée majoritairement de roches basaltiques qui se présentent sous forme d'agglomérats ou de brèches volcaniques interstratifiées avec du calcaire. Ces roches basaltiques sont absentes sur les îles du nord de l'archipel. Elles constituent les monts coniques fortement altérés et typiques des îles du Havre-Aubert, du Cap-aux-Meules, du Havre-aux-Maisons et d'Entrée (figure 2.5). La Formation du Cap-au-Diable se présente sous forme de blocs disjoints qui ont été poussés vers le haut au travers de la Formation du Cap-aux-Meules (qui se trouve normalement au sommet de la séquence) à la suite de mouvements verticaux liés au diapirisme.

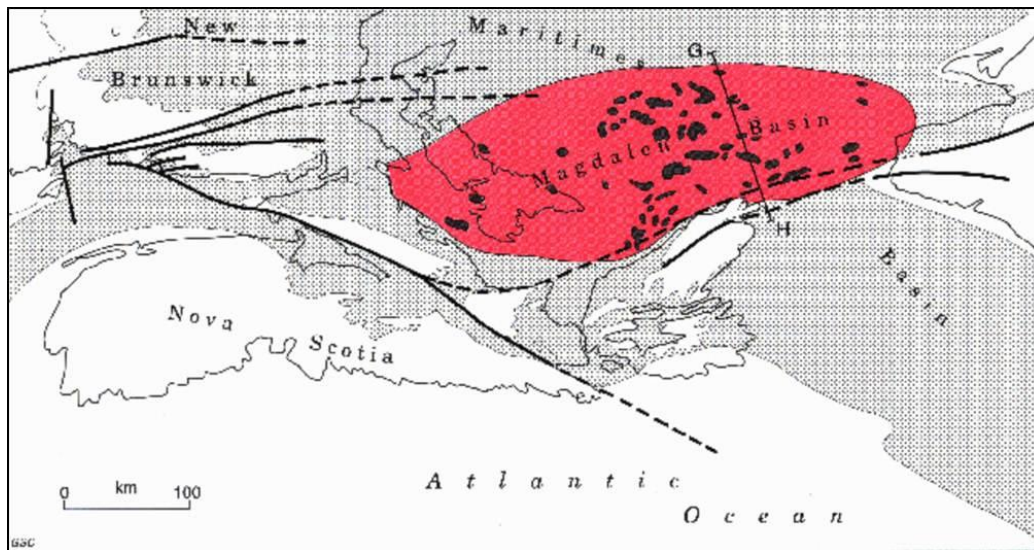


Figure 2. 4. Sous-bassin des Îles-de-la-Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent (tirée d'Université LAVAL, 2012 (a)).

La Formation du Havre-aux-Maisons sous-tend le relief de plate-forme (basses terres) qui s'étale au pied des collines volcaniques de la Formation du Cap-au-Diable. Dans les secteurs où les argilites dominent, notamment à l'Anse à la Cabane et à l'Anse au Plâtre sur l'île du Havre-Aubert, le paysage est caractérisé par la présence de **dolines**. Ces argiles ont tendance à se liquéfier lorsqu'elles sont saturées en eau tandis que le calcaire et le gypse ont tendance à se dissoudre sous l'effet des eaux courantes créant ainsi des conduits souterrains et des dolines en surface (Dubois, 1992).

La Formation de Cap-aux-Meules comprend deux membres, soit le Membre de l'Étang-du-Nord à la base et le Membre de l'Étang-des-Caps au sommet (Tableau 2.1) (Brisebois 1981; Comte, 2008; Maillet, 1992). Le Membre de l'Étang-du-Nord est composé essentiellement de grès gris d'origine fluviatile (80 %). Le Membre de l'Étang-des-Caps est constitué de grès éoliens mal consolidés présentant des stratifications et des laminations obliques géantes. Les roches du Membre de l'Étang-des-Caps, plus simplement désignées sous l'appellation « grès rouge », occupent environ le tiers de la surface totale de l'archipel et marquent de façon très caractéristique le paysage des Îles (figure 2.5). Finalement, la distribution des roches visibles en surface aux Îles-de-la-Madeleine est contrôlée essentiellement par un réseau de failles subverticales qui délimitent une série de **horsts** et de grabens (figure 2.2 A). La présence d'importants dépôts de sels sous l'archipel est à l'origine de cette structure; la remonté du sel par

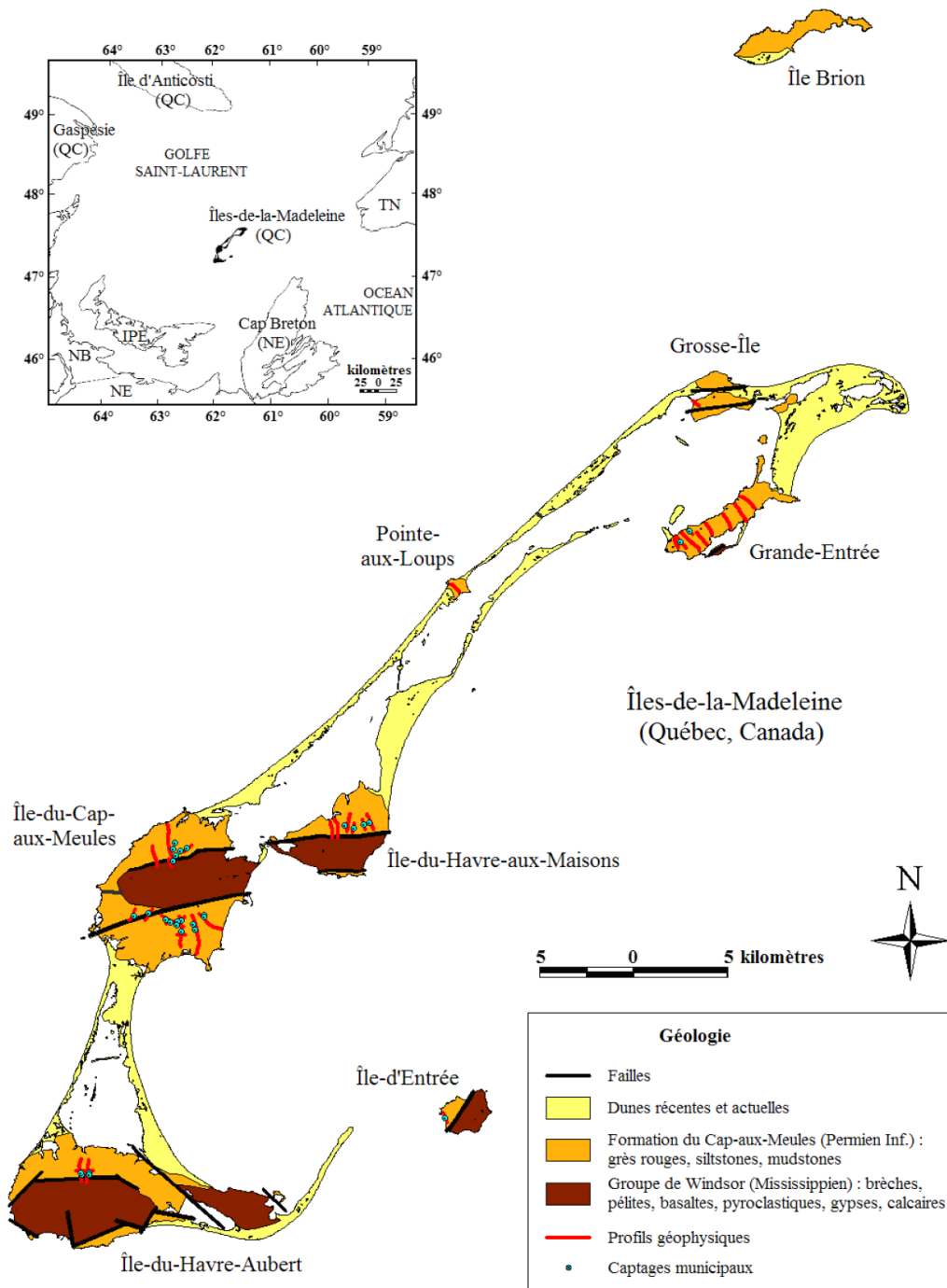


Figure 2. 5. Répartition simplifiée des différentes formations géologiques des Îles-de-la-Madeleine (tirée de Comte, 2008 et modifié de Brisebois, 1981).

2.1.3 Dépôts meubles du Quaternaire

La stratigraphie, l'agencement et la porosité des dépôts meubles au sommet des unités géologiques contrôlent la quantité et la qualité des eaux qui rechargent l'aquifère. Une bonne connaissance de l'histoire et de la répartition spatiale des dépôts meubles est complémentaire à la géologie.

2.1.3.1 Dépôts wisconsinien

Les îles de Havre-Aubert et de Cap-aux-Meules sont recouvertes par un dépôt caillouteux hétérogène (appelé **diamicton**) qui repose directement sur le substrat rocheux et dont la matrice dominante, est composée d'un sable rouge allant de fin à très fin. Son épaisseur varie de moins d'un mètre à plus de six mètres (Dredge *et al.*, 1992; Rémillard, 2011). Par endroits, ce dépôt est très bien consolidé, en particulier près de la surface en raison de la pédogenèse postglaciaire (cimentation liée au développement d'un **ortstein**). À d'autres endroits, le diamicton est plus lâche et sa matrice est composée de sable un peu plus grossier. La répartition exacte de ce dépôt discontinu n'est pas connue, car il n'a jamais été cartographié.

Au nord de l'archipel madelinot, ce sont les dépôts meubles des îles de la Pointe-aux-Loups et de la Grande-Entrée qui ont été les plus étudiés (Vigneault, 2012). Deux secteurs de l'île de la Pointe-aux-Loups présentent des dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur (1 à 8 m) qui sont composés de roches provenant du Bouclier canadien, baignant dans une matrice de sable grossier. Ces dépôts sont recouverts par une unité finement stratifiée formée par une alternance de lits sableux et de fins lits silteux (4 à 10 m). L'île de la Grande-Entrée possède les dépôts meubles les plus importants des Îles-de-la-Madeleine en termes d'épaisseur. À deux endroits (Bluff & Sand Cove), une unité de plus de 15 à 20 m d'épaisseur, composée de sables stratifiés horizontaux et de quelques passages silteux et argileux, est exposée. Les dépôts qui recouvrent les îles de la Pointe-aux-Loup et de la Grande-Entrée ainsi que la plateforme gréseuse qui compose la majeure partie de ces îles sont surmontés par un mince till parfois remanié par des processus littoraux (Vigneault, 2012). Pour plus d'informations sur les dépôts wisconsinien aux Îles-de-la-Madeleine, consultez l'annexe 1.

Dans l'ensemble, la distribution sporadique et la faible épaisseur des dépôts meubles font en sorte qu'ils jouent un rôle hydrogéologique négligeable à l'échelle de l'archipel; les principaux aquifères étant situés dans les formations géologiques poreuses tels les grès de la Formation de

Cap-aux-Meules. Leur faible étendue laisse penser que les dépôts meubles influencent peu la recharge et la dynamique des aquifères sous-jacents. Toutefois, à l'échelle locale, dans les secteurs où ils atteignent quelques mètres d'épaisseur, il se peut que les dépôts meubles jouent un rôle non négligeable dans la recharge des aquifères. Les observations effectuées dans les falaises côtières soulignent l'importance de ces dépôts, notamment les dépôts de sables rouges du diamicton, dans la concentration de l'écoulement au sommet du socle rocheux. Par ailleurs, dans les secteurs où ils reposent sur des roches imperméables, les dépôts meubles abritent des aquifères perchés de petites dimensions et relativement vulnérables étant donné leur faible profondeur. C'est le cas par exemple à l'Anse à la Cabane. Même si, au total, le volume d'eau contenu dans les dépôts meubles semble minime par rapport à ceux qu'abritent les grès, il se peut que localement, ils puissent soutenir l'alimentation résidentielle (puits privés). L'une des difficultés en ce qui concerne le rôle hydrologique des dépôts meubles réside dans le fait qu'on ne connaît pas l'étendue exacte des corps sédimentaires, parfois épais, que l'on observe localement dans les gravières et les falaises.

2.1.3.2 Dépôts holocènes

Une bonne partie des dépôts meubles hérités de la dernière glaciation ont par la suite été remaniés par les vagues et les courants lors de la transgression marine qui a accompagné la déglaciation. Les sédiments quaternaires remaniés se sont ajoutés aux volumes de sédiments arrachés aux falaises rocheuses pour nourrir de grands corps sédimentaires côtiers que nous décrivons brièvement ci-dessous. L'influence de la géologie et de la géomorphologie des côtes sur l'**intrusion saline** et les conditions hydrogéologiques de la zone de mélange eau douce/eau salée a déjà été décrite dans plusieurs études (Rizzetto *et al.*, 2003; Bear *et al.*, 1999).

Les grands types de côtes

Selon la Chaire de recherche en Géosciences côtières de l'UQAR, il existe huit types de côtes aux Îles-de-la-Madeleine. Les côtes à cordons littoraux représentent 41 % du littoral de l'archipel. Les tombolos – type de cordon littoral – correspondent à des accumulations de sable dunifié qui relient les îlots rocheux entre eux (figure 2.7A). Ces cordons, d'une grande porosité, représentent une réserve potentielle d'eau douce. Leur faible altitude et leur proximité à l'océan les rendent cependant extrêmement vulnérables aux intrusions d'eau saline (*cf.* chapitre 3). Ce sont des voies d'échanges entre l'eau douce, l'eau de mer et l'eau des lagunes qui se situent à proximité. Les côtes rocheuses à falaise (hauteur > 2 m) sont le deuxième type de côte le plus important aux Îles-

de-la-Madeleine (25 %) (figure 2.7 B). Elles sont le plus souvent composées de grès ou de roches volcaniques. Le recul des falaises pourrait éventuellement menacer l'intégrité des canalisations enfouies à proximité. Ce facteur devrait être pris en compte dans le développement futur des réseaux d'adduction d'eau potable et d'évacuation des eaux usées. Les flèches littorales sont elles aussi fortement représentées sur l'archipel madelinot (20 %). Il s'agit d'accumulations sableuses attachées à la côte par l'une de leurs extrémités tandis que l'autre se termine dans la mer. Certaines sont dunifiées (Sandy Hook), d'autres abritent un marais (Bassin-aux-Huîtres). Les éventuels aquifères qu'elles abritent sont soumis aux mêmes contraintes que ceux des tombolos. Les falaises rocheuses à sommet meuble représentent 5,2 % du littoral madelinot. Il s'agit de falaises rocheuses surmontées de dépôts meubles quaternaires au sommet (figure 2.7C). Viennent ensuite les terrasses de plage qui comptent pour environ 4,2 % du littoral aux Îles-de-la-Madeleine. Elles correspondent à des accumulations de sable littoral formées d'un replat souvent végétalisé au sommet et dans certains cas d'une microfalaise de moins de 2 m de hauteur. Finalement, les zones artificialisées, les falaises composées uniquement de dépôts meubles et les marais maritimes représentent respectivement 1,5 %, 1,4 % et 0,5 % du littoral madelinot.

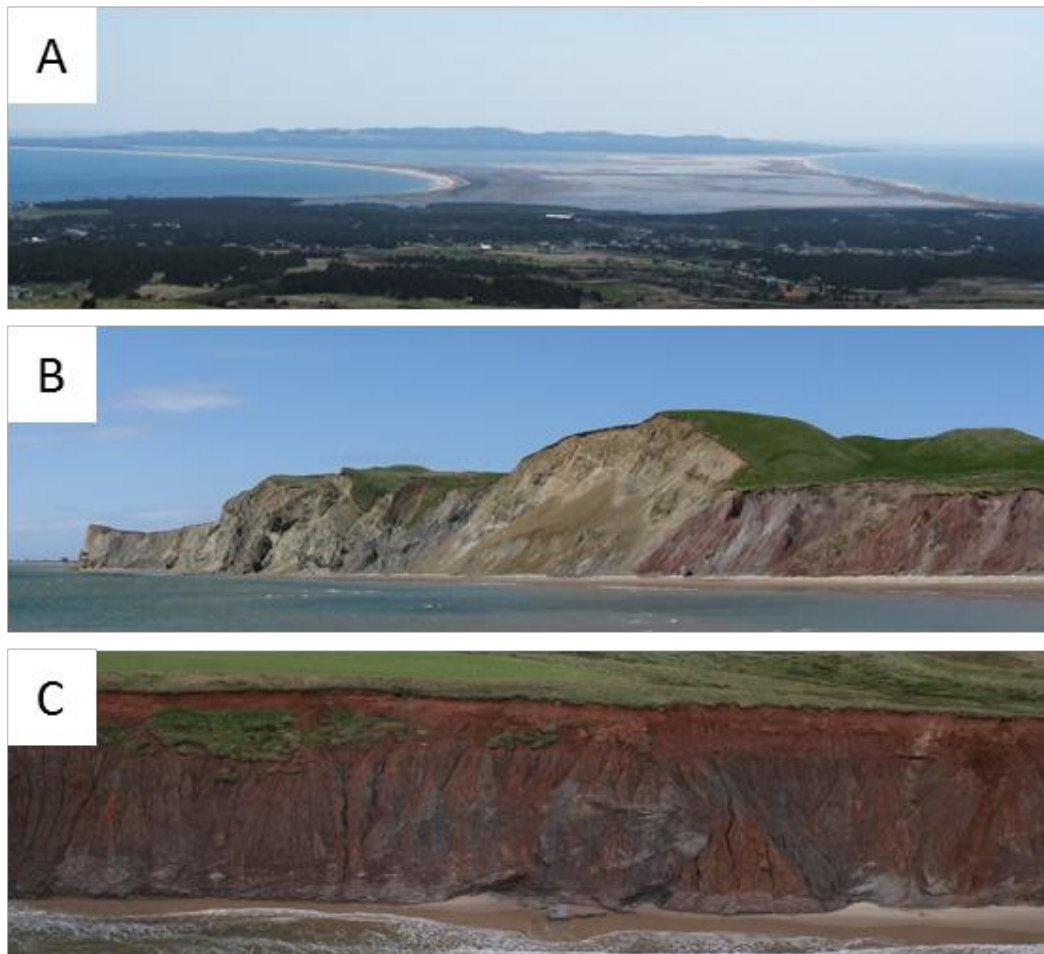


Figure 2. 7. A) Côtes à cordons littoraux; tombolos qui relie l'île de Cap-aux-Meules à l'île de Havre-Aubert. B) Côtes rocheuses; contact entre le grès gris du Membre de l'Étang-du-Nord et le grès rouge du Membre de l'Étang-des-Caps. C) Falaise rocheuse (argilite) à sommet meuble. (Source : Audrey M. Rémillard).

2.1.4 Le sol

Sous un climat et une végétation donnés, la quantité d'eau qui alimente les eaux de surface et les eaux souterraines est principalement déterminée par les caractéristiques des sols sur lesquels elle ruisselle ou dans lesquels elle s'infiltré (Bruand & Coquet, 2005). Le type de sol influence l'évaporation, la transpiration, l'écoulement de surface ou ruissellement qui interviennent dans la recharge de la **nappe d'eau**. La composition chimique et la qualité de l'eau qui sera emmagasinée dans le réservoir dépendent également des processus de formation et d'évolution du sol, que ce sol soit d'origine naturelle ou anthropique. Pour plus d'informations sur la description et la formation des sols, consultez l'annexe 2.

2.1.4.1 La pédologie des Îles-de-la-Madeleine

Les connaissances actuelles sur les sols du territoire des Îles-de-la-Madeleine proviennent des études réalisées par Miroslav Grandtner (1966) et par Lauréan Tardif (1967; 1978). La première portait plus spécifiquement sur la végétation tandis que la seconde avait pour objectif d'établir le potentiel agricole des sols madelinien. L'étude exhaustive de Tardif a permis de reconnaître cinq ordres de sols sur l'archipel, soit les podzols, les brunisols, les régosols, les gleysols et les sols organiques. Étant donné le relief plutôt vallonné des Îles, les dépôts de surface ont généralement été déplacés vers le bas des pentes par les processus d'érosion gravitaire regroupés sous le terme général de colluvionnement (ruissellement, reptation, solifluxion). Par conséquent, la nature et l'épaisseur des sols dépendent en grande partie de la topographie. Suivant un schéma classique, on note des sols à la fois plus minces et caillouteux sur le sommet des collines et des sols plus épais et plus fins sur les flancs et au bas des collines. Ce phénomène est accentué par l'absence de végétation, ce qui a tendance à accroître l'érosion (Agence régionale de mise en valeur des forêts privées de la Gaspésie - Les Îles). Les podzols et régosols sont de loin les deux ordres dominants sur l'archipel (tableau 2.2; annexe 3; figure 2.8).

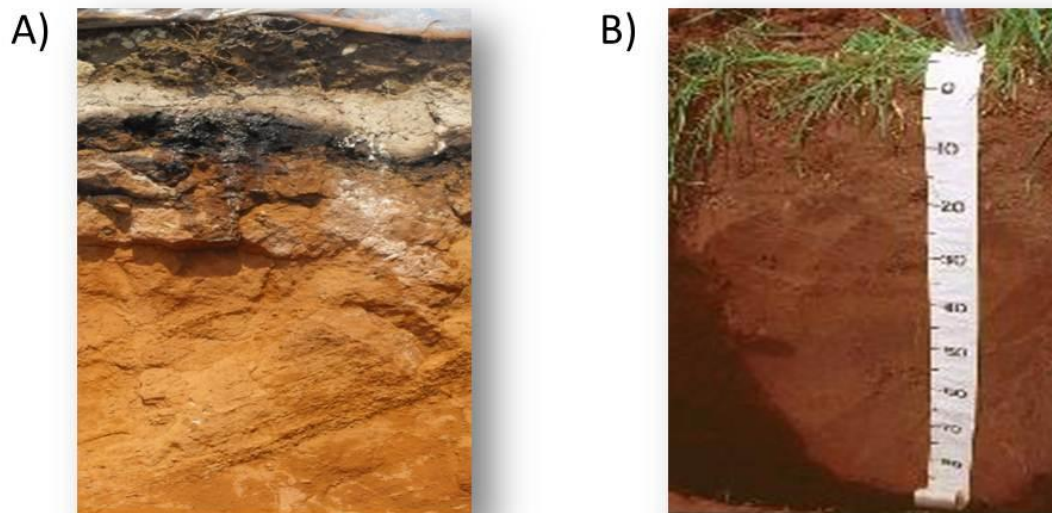


Figure 2. 8. A) Podzol humique à ortstein (Source : Maud Touchette) et B) Régosol alluvial (tirée de Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2011).

Tableau 2. 2. Légende des sols des Îles-de-la-Madeleine (d'après Tardif, 1967)

Série de sols	Ordre	Sous-groupe	Dépôt	Superficie (km ²)
Anse à la Cabane	Podzol	Podzol-orthique	Matériau résiduel	1.99
Lavernière	Podzol	Podzol-orthique	Glaciomarin	19.21
Madelinot	Podzol	Podzol-orthique	Till	7.43
Aurigny	Podzol	Podzol-orthique	Till local	2.85
Vigneault	Podzol	Podzol-orthique	Till	2.85
Le Bassin	Podzol	Podzol-orthique	Till	2.96
Brion	Podzol	Podzol-orthique évoluant vers un podzol humique	Résiduel	3.66
Grosse Ile	Podzol	Podzol-orthique	Résiduel	2.10
Les Demoiselles	Podzol	Podzol-orthique érodé à régosol	Till local	6.19
Pointe Basse	Podzol	Podzol minimal	De colluvions	1.67
Havre-aux-Maisons	Podzol	Podzol minimal à brun boisé accidenté dégradé	Till	6.94
Fatima	Podzol	Podzol à ortstein	Résiduel	9.80
Coffin	Podzol	Podzol humique à ortstein	Résiduel	18.25
Gros Cap	Podzol	Podzol à ortstein à podzol humide	Résiduel	22.12
Étang du Nord	Podzol	Podzol concrétionné gleyifié	Marin	2.91
Corfu	Podzol	Podzol concrétionné gleyifié	Alluvionnaire	3.82
Boisville	Brunisol	Brun boisé acide dégradé	Till local	1.02
Solomon	Brunisol	Brun boisé acide dégradé	Till	5.6
Belle-Anse	Régosol	Régosol orthique	Alluvion	2.20
Grand-Ruisseau	Régosol	Régosol orthique	Till argileux	4.41
Ile d'Entrée	Régosol	Régosol orthique	Résiduel affleurement	0.7
Millerand	Gleysol	Gleysol orthique à gleysol tourbeux		1.35
Havre-Aubert	Gleysol	Gleysol orthique humifié		0.75
Savanes et marécages				3.72
Tourbes				0.7
Terres noires				3.39
Dunes	Régosol	Régosol orthique	Sable éolisé	67.12

Ces deux types de sol sont caractérisés par une perméabilité dite normale, c'est-à-dire qu'ils laissent l'eau s'infiltrer assez facilement jusqu'aux formations géologiques (Groupe de travail sur la classification des sols, 2002), représentées dans ce cas-ci par les grès rouges de la Formation de Cap-aux-Meules. Rappelons que ces grès sont eux-mêmes reconnus pour leur porosité élevée et leur grande perméabilité (Comte, 2008).

La très grande majorité des sols des Îles-de-la-Madeleine appartiennent à l'ordre podzologique. Typiquement, les podzols se développent sur un matériel parental acide de textures grossières à moyenne, sous une végétation de forêt ou de lande et dans un climat froid, tempéré ou chaud (Groupe de travail sur la classification des sols, 2002). Dans ce cas-ci, la podzolisation des sols découle de l'altération des formations de grès rouge, donnant ainsi lieu à l'apparition d'un sol très acide qui a généralement évolué vers le podzol humique ou le podzol orthique. L'une des principales caractéristiques des podzols de l'archipel est la présence, à quelques dizaines de centimètres sous la surface, d'un horizon illuvial fortement cimenté (ortstein) de couleur

rougeâtre (Tardif, 1978). Grandtner (1967) qualifie ces sols à ortstein comme étant relativement acides et secs, assez peu fertiles et supportant des peuplements de faible valeur économique. Cet horizon induré, dont on ne connaît ni les caractéristiques (épaisseur, porosité, structure continue ou fragmentée), ni l'étendue, pourrait avoir une influence considérable sur la distribution des zones d'infiltration et donc de recharge des aquifères. Près des côtes, il pourrait contrôler la décharge des eaux souterraines dans la zone littorale et participer à l'érosion des falaises, comme c'est le cas sur la Côte-Nord du Saint-Laurent (Bernatchez & Dubois, 2008). Bref, le manque de données sur cet horizon induré est particulièrement frappant.

2.2 PORTRAIT HUMAIN DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

Le territoire madelinien s'étale sur 360 km², incluant l'espace occupé par les lagunes et les superficies de sable découvertes ou faiblement submergées lors des marées les plus basses. L'archipel comprend une quinzaine d'îles dont huit sont habitées et sept sont reliées par les cordons dunaires (ces îles sont, du nord au sud : de la Grande-Entrée, de l'Est, la Grosse-Île, de la Pointe-aux-Loups, du Havre-aux-Maisons, du Cap-aux-Meules et du Havre-Aubert). L'île d'Entrée, l'unique île habitée non rattachée, se trouve à 16 km de Cap-aux-Meules. Les photos de la figure 2.9 nous permettent de voir la croissance de l'urbanisation et la diminution du territoire accordé à l'agriculture durant le siècle dernier.

Aux Îles-de-la-Madeleine, on retrouve deux municipalités, soit celle de Grosse-Île, qui compte 4 % de la population totale, et celle des Îles-de-la-Madeleine avec 96 % de la population. En 2012, la population s'élève à 14 232 habitants (Îles-de-la-Madeleine, 2012). Depuis 1971, la population résidentielle permanente est demeurée assez stable, variant entre 13 000 et 14 000 habitants (Statistique Canada, 2012). Plus de la moitié de la population (57 %) se concentre dans les trois villages de l'île centrale, soit L'Étang-du-Nord, Fatima et Cap-aux-Meules. La compaction et l'imperméabilisation des sols figurent parmi les principales conséquences de l'urbanisation. La compaction représente le tassement du sol suite à une pression mécanique importante comme la construction et/ou la présence de machinerie lourde, alors que l'imperméabilisation se caractérise par un sol recouvert en permanence de matériaux imperméables comme de l'asphalte ou du béton. Ainsi, l'augmentation de la population et l'étalement des espaces urbanisés ont un impact direct sur la recharge des aquifères en diminuant la surface de sol perméable disponible (Brahay & Løyen, 2012). Aussi, la pression exercée sur la nappe phréatique par l'augmentation de la population durant la période estivale, n'est pas à

négliger. Selon Statistique Canada (2012), durant l'été 2006, les 13 091 résidents permanents ont accueilli 50 500 visiteurs, soit un ratio de 3,86 visiteurs par habitant, alors que la moyenne canadienne pour la même année est de 0,58 visiteur par habitant.

Le dernier schéma d'aménagement produit en 2010 par l'agglomération des Îles-de-la-Madeleine (2010), propose huit grandes affectations du territoire, soit agricole (13 %), conservation (41 %), forestière (17 %), industrielle (2 %), périmètre d'urbanisation (2 %), noyaux villageois (2 %), rurale (23 %) et villégiature (1 %) (figures 2.10 et 2.11). Les aires de conservation ont été créées afin de répondre à un besoin de protection de portions du territoire considérées comme étant fragiles. Ce sont des zones où toute forme d'intervention, même minime, risque de perturber l'équilibre de manière soit temporaire ou irréversible. Les zones de conservation visées par le schéma d'aménagement sont les habitats et les ressources marines, les cordons dunaires (complexes dunes-lagunes), les terres basses et humides, les tourbières et les secteurs d'intérêts fauniques et écologiques.

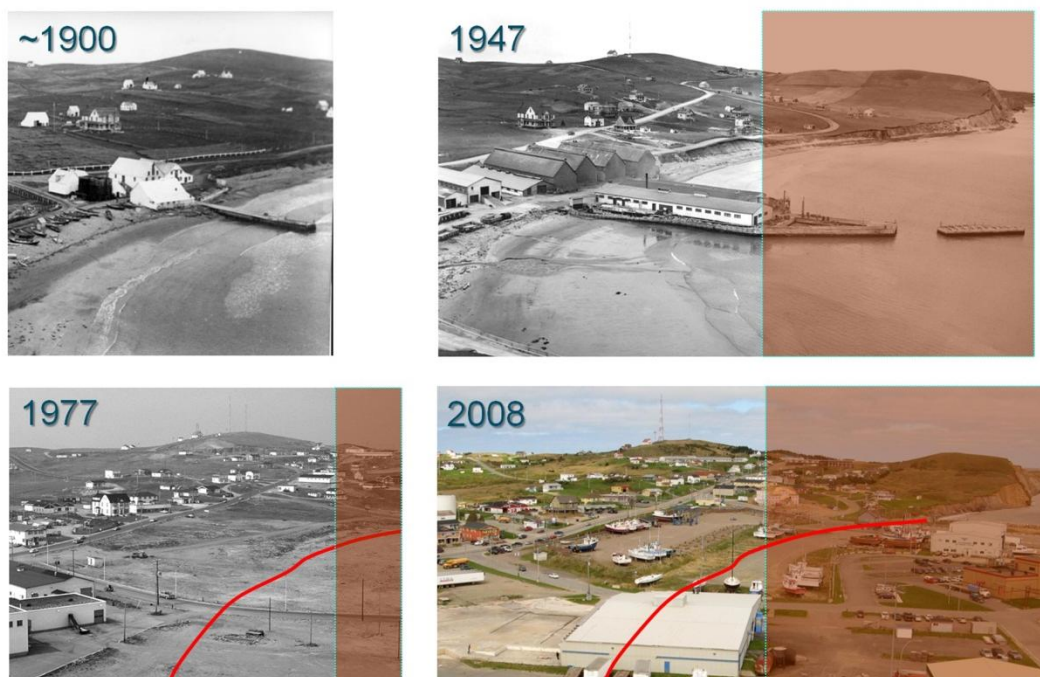


Figure 2. 9. Évolution de l'occupation du territoire de Cap-aux-Meules entre 1900 et aujourd'hui; la ligne rouge marque la position du remblayage du littoral dans les années 1970 (Tita & Richard, 2009).

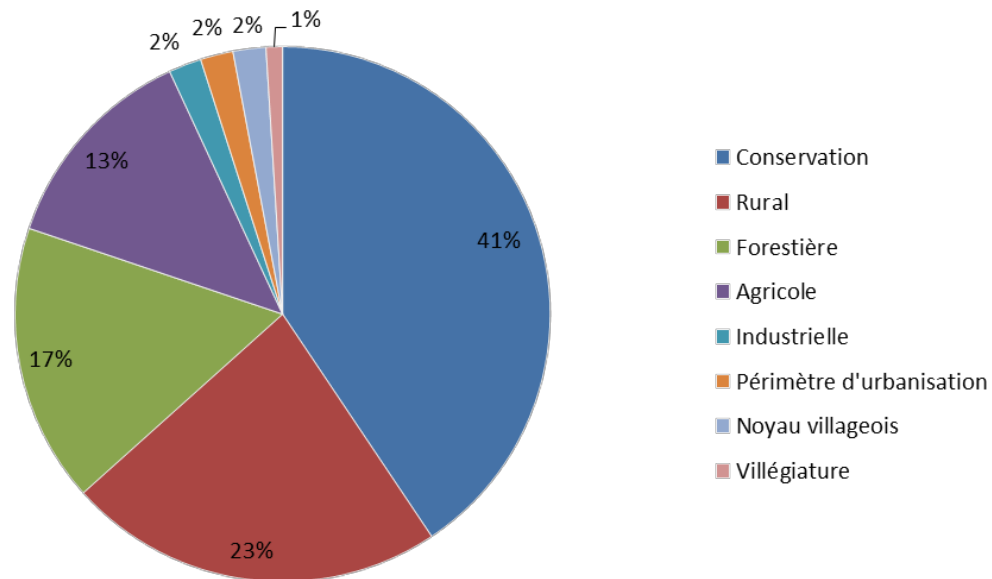


Figure 2. 10. Les grandes affectations du territoire des Îles-de-la-Madeleine (inspirée d'Agglomération des Îles-de-la-Madeleine 2010).

Pour ce qui est de la villégiature, le schéma d'aménagement vise plus particulièrement le milieu dunaire et les milieux boisés situés principalement au centre des noyaux rocheux. La municipalité désigne ces milieux de villégiature afin de diminuer la pression engendrée par l'activité humaine sur les terres publiques et les milieux fragiles. Elle collabore étroitement avec le ministère des Ressources naturelles (MRN) afin de penser et de créer des aménagements qui correspondent aux préoccupations du milieu.

Le zonage du territoire agricole permet d'assurer un espace viable au développement de l'agriculture tout en évitant le plus possible les conflits d'utilisation du sol et les impacts négatifs qui en résultent. De plus, la zonation liée à l'activité agricole assure la concentration du secteur résidentiel à l'intérieur des zones urbaines tout en contribuant à la conservation du paysage, qui est l'une des plus importantes richesses naturelles des Îles.

Dans son bilan forestier 2008, le Consortium en foresterie Gaspésie – Les Îles mentionne que la forêt demeure vulnérable et fragile étant donné que les rudes conditions climatiques, la compétition herbacée et la complexité logistique (due à l'absence de cartes récentes et à l'ambiguïté des divisions cadastrales) rendent le reboisement et l'expansion forestière difficiles. Le zonage forestier comprend les territoires actuellement boisés ainsi que ceux ayant un potentiel

de boisement. La conservation du couvert forestier apparaît comme primordiale aux Îles-de-la-Madeleine étant donné le rôle prépondérant que la forêt joue dans le réapprovisionnement des nappes phréatiques. La Commission sectorielle Environnement – Îles a d'ailleurs reconnu le maintien de la forêt comme étant essentiel pour l'avenir de la ressource en eau souterraine (Anonyme, 1999). En effet, la forêt permet entre autres l'interception des précipitations par la canopée et l'augmentation du taux d'infiltration dans les sols, en plus de réduire le taux d'érosion (Consortium en foresterie Gaspésie – Les Îles, 2008).

Le zonage industriel quant à lui comprend les industries légère, modérée et lourde. Il s'agit, pour l'essentiel, d'entreprises de petites tailles fabricant des produits locaux, de compagnies de transport, de traitement de matière résiduelle, de cimenteries, de gravières et sablières, de la zone d'exploitation de la mine de sel ainsi que d'un site visé pour l'implantation et l'exploitation d'éoliennes. Il faut mentionner que l'exiguïté du territoire, les zones résidentielles plutôt étalées et la réticence de la population à l'installation d'industries ne facilitent pas le développement du secteur industriel.

Finalement, l'affectation du territoire liée à l'urbanisation comprend le périmètre d'urbanisation, le noyau villageois et l'affectation rurale. On y inclut l'établissement de résidences unifamiliales, bifamiliales et multifamiliales, l'implantation de services (aqueducs, égouts) et de commerces pour la population, ainsi qu'une zone faiblement peuplée comprenant majoritairement des résidences unifamiliales (zone rurale).

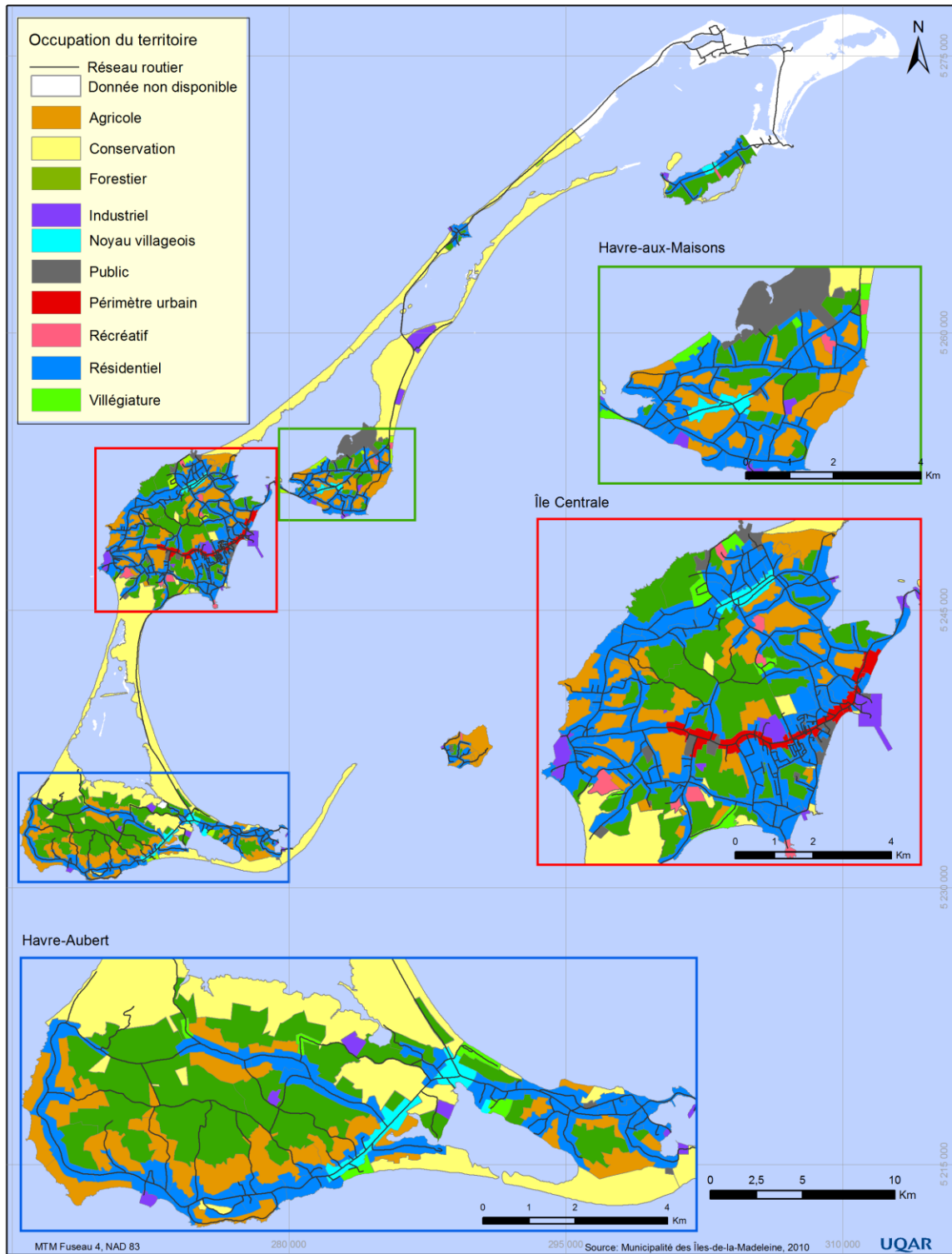


Figure 2. 11. Carte de l'occupation du territoire des Îles-de-la-Madeleine (adaptée d'Agglomération des Îles-de-la-Madeleine, 2010).

« *Les eaux souterraines du Canada sont de plus en plus menacées par l'urbanisation, l'évolution du climat, la production croissante d'énergie, l'intensification de l'agriculture et la contamination* »

Conseil des Académies canadiennes (2012)



2.3 LES PRESSIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES QUI S'EXERCENT SUR LA RESSOURCE EN EAU ET SCÉNARIOS FUTURS

2.3.1 Les pressions naturelles

La capacité des modèles hydrogéologiques à intégrer les variabilités et les changements climatiques observés et futurs est un enjeu fondamental pour prédire le devenir des ressources en eau souterraine (Rivera *et al.*, 2004; IPCC, 2007). Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes vulnérables, comme celui des Îles-de-la-Madeleine. Une bonne connaissance des changements déjà observés et de ceux prédits est importante pour la mise en place d'une gestion durable de la ressource en eau souterraine.

Situé au cœur du golfe du Saint-Laurent, l'archipel des Îles-de-la-Madeleine est sous l'emprise de plusieurs agents hydroclimatiques. Les principaux sont les vents, les vagues, les processus cryogéniques, les tempêtes et la variation du niveau marin (Bernatchez *et al.*, 2008). Ces processus sont d'une intensité variable dans le temps et dans l'espace. Ils peuvent évoluer de manière saisonnière ou encore varier d'une année à l'autre, toucher tout l'archipel ou certains secteurs en particulier suivant l'orientation des vents. Par ailleurs, les changements climatiques actuels jouent un rôle important en ce qui a trait à l'intensité et à la fréquence des processus hydroclimatiques. Les différents scénarios futurs permettent d'évaluer leurs impacts à court, à moyen et à long terme. Il est essentiel que les pressions naturelles agissant sur les Îles-de-la-Madeleine soient considérées dans l'évaluation de l'état de la ressource en eau afin d'estimer la recharge annuelle de la nappe phréatique ou encore d'évaluer la capacité d'accueil des réservoirs souterrains d'eau douce.

2.3.1.1 Changements climatiques – précipitations et températures

La vitesse de réchauffement des températures moyennes annuelle et hivernale a augmenté depuis les 20 dernières années (1987-2006) (Bernatchez *et al.*, 2008). L'analyse historique de la température moyenne annuelle (TMA) aux Îles-de-la-Madeleine affiche une tendance forte et

positive (+ 1,9°C de 1985-2006), ce qui représente une hausse de la TMA de 0,09°C/année, soit le taux le plus élevé observé par Bernatchez *et al.* (2008) dans le Québec maritime. La saison hivernale est la plus touchée par ce réchauffement (+ 3,2°C), le mois de février étant en tête (+ 3,85°C) (figure 2.12). La principale conséquence de la hausse des températures moyennes hivernales est une augmentation du nombre de redoux hivernaux. Cette hausse provoque également une diminution du nombre de jours de gel (< 0°C), concordant avec la diminution du couvert de glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Les précipitations totales aux Îles-de-la-Madeleine affichent une tendance à la baisse au cours des 20 dernières années (1987-2006) (Bernatchez *et al.*, 2008). En revanche, les précipitations liquides montrent une tendance à la hausse de + 1,7 mm/année pour cette même période, pour un total de 30 mm, alors que les précipitations solides affichent une diminution de 92,8 cm pour la période 1984-1999, soit - 5,11 cm/année (figure 2.13). Par ailleurs, les pluies hivernales sont en forte augmentation (+ 42,9 mm; 1984-2002). Pour la période 1983-2006, 12 événements de pluies diluviennes ont été comptabilisés avec une moyenne de 66,2 mm de pluie par événement.

Les prévisions établies par Bernatchez *et al.* (2008) pour la période 2041-2070 concernent principalement les redoux hivernaux et les précipitations. Leur modèle (CGCM2) prévoit une moyenne du nombre de jours de redoux hivernal de 85,2 jours, soit une nette augmentation par rapport à la période 1980-2006 qui affiche une moyenne de 21 jours. Selon ce même modèle, les précipitations neigeuses et les jours comportant un cycle de gel et de dégel seront inexistantes, tandis que les précipitations liquides en hiver seront en moyenne de 219 mm/année ce qui correspond au double de la moyenne de la période 1984-2002 (101 mm).

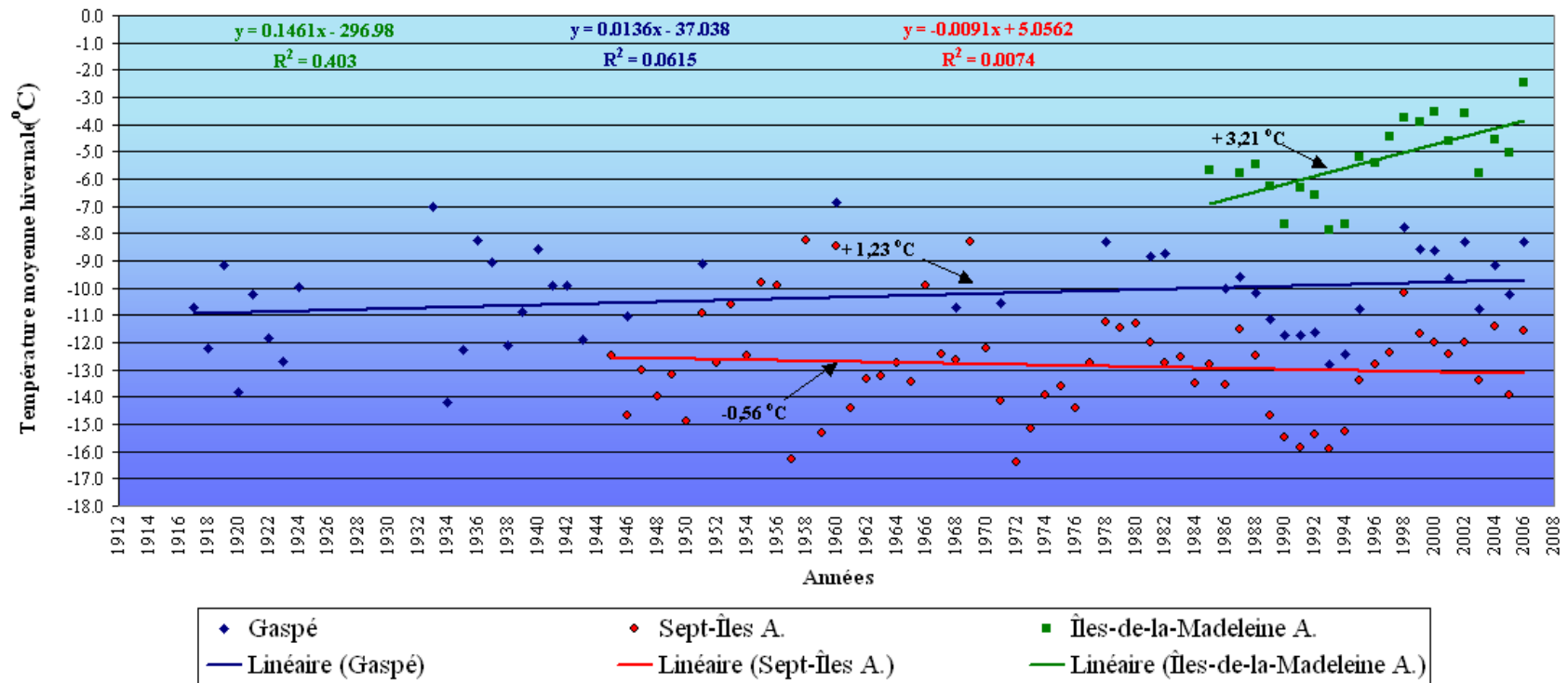


Figure 2. 12. Tendances des températures moyennes hivernales aux stations météorologiques de Sept-Îles, de Gaspé et des Îles-de-la-Madeleine (tirée de Bernatchez *et al.* 2008).

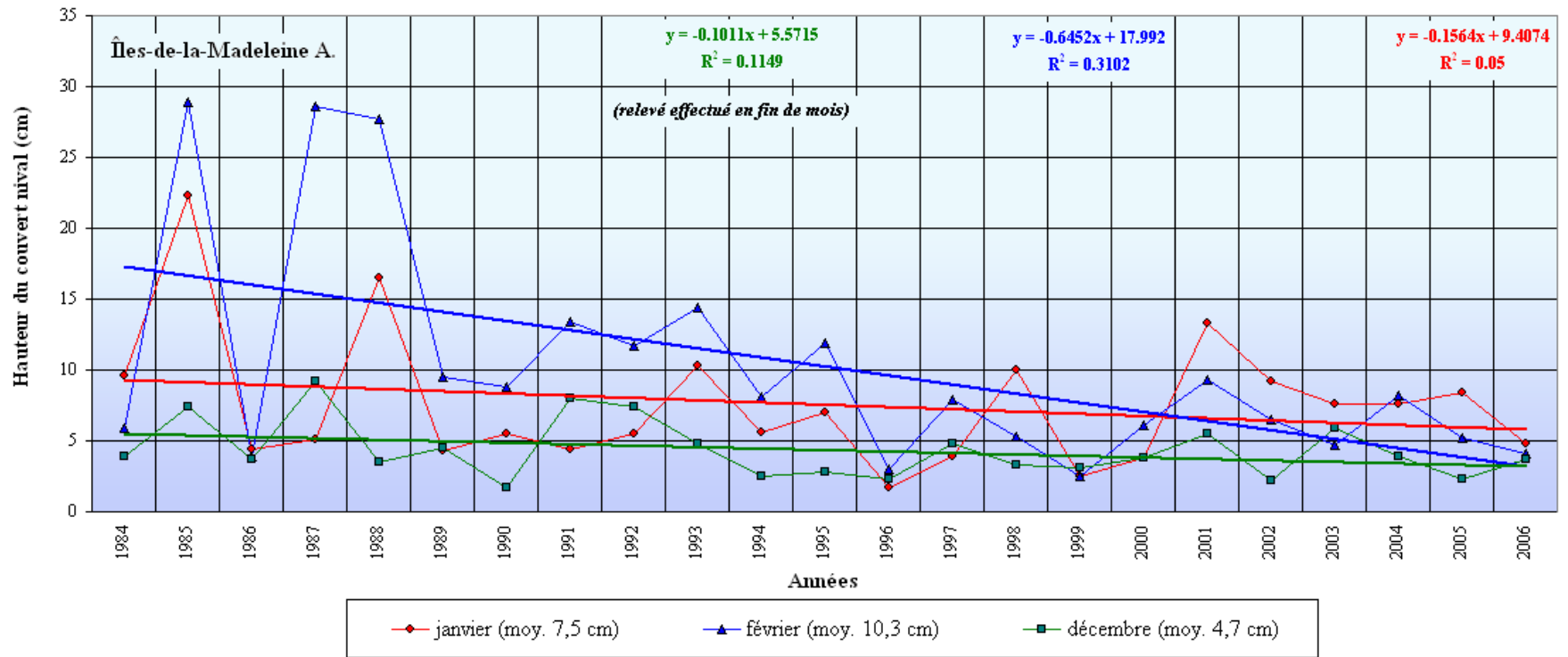


Figure 2. 13. Hauteurs et tendances mensuelles de l'épaisseur du couvert nival pour la station des Îles-de-la-Madeleine (tirée de Bernatchez *et al.*, 2008).

2.3.1.2 Submersion

Le niveau marin mondial (NMM) a augmenté de 20 cm depuis la révolution industrielle sous l'effet de la fonte des glaciers et de la dilatation thermique des océans (Jevrejeva *et al.*, 2008). Selon Cazenave *et al.* (2008), la hausse du NMM s'est même accélérée dans les vingt dernières années. Dans les Maritimes, il faut également tenir compte d'un mouvement de subsidence qui persiste depuis des milliers d'années (Gehrels *et al.*, 2004). Selon Dubois (1992), les Îles-de-la-Madeleine seraient en subsidence depuis environ 6 500 ans. Une fois additionnées, la hausse du NMM et la subsidence se traduisent par une hausse accélérée du niveau marin relatif (NMR) qui a été estimée aux Îles à 3,5 mm/année depuis les années 1960 (Juneau, 2012), ce qui concorde avec les études menées à l'Île-du-Prince-Édouard et au nord de la Nouvelle-Écosse (Koohzare *et al.*, 2006; McCulloch *et al.*, 2002; Parkes *et al.*, 2006). Conséquemment, c'est plus de 70 % du littoral des Îles-de-la-Madeleine qui est à risque de submersion (Bernatchez *et al.*, 2008). Pour l'horizon 2100, Forbes *et al.* (2004) ont suggéré une augmentation du NMR de $0,7 \pm 0,4$ cm à l'Île-du-Prince-Édouard, ce qui dépasse les pires scénarios du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC, 2007).

2.3.1.3 Érosion et recul des côtes

L'évolution historique (1963-2001) du trait de côte et l'état actuel de celui-ci ont été étudiés par Bernatchez *et al.* (2008; 2010) pour les îles de Havre-Aubert, de Cap-aux-Meules et de la Pointe-aux-Loups, où on trouve principalement des falaises de grès, des terrasses de plage et des tombolos. Selon ces travaux, les falaises rocheuses et les terrasses de plage du secteur Havre-Aubert – Cap-aux-Meules étaient, dans les deux cas, en recul avec des taux respectifs de -0,46 et -0,31 m/année. Il apparaît que les périodes pendant lesquelles les températures hivernales plus chaudes (1977-1983 et 2001-2007) présentent les taux de recul les plus importants en raison du plus grand nombre de redoux hivernaux et de pluies hivernales, ce qui favorisent les processus cryogéniques, *c.-à-d.* l'ensemble des processus liés au gel-dégel. De plus, ces périodes sont caractérisées par une réduction substantielle du couvert de glace, ce qui entraîne une diminution de la protection du littoral qui est alors directement exposé aux vagues. Par ailleurs, les périodes de forte érosion aux Îles-de-la-Madeleine correspondent également aux périodes où la fréquence des tempêtes a été très importante (1977-1983 et 1983-1992).

Le scénario d'érosion pour 2050 envisagé par Bernatchez *et al.* (2008) implique une accélération de ce phénomène par rapport à la moyenne historique. Selon ce scénario, les tombolos, les flèches

littorales et les terrasses de plage du secteur Havre-Aubert – Cap-aux-Meules devraient reculer respectivement de 40 m, 91 m et 48 m, tandis que les falaises rocheuses reculeraient de 34 m (-0,70 m/année). Pour le secteur de Pointe-aux-Loups, le recul devrait être de 97 m pour les tombolos, de 41 m pour les terrasses de plage et de 56 m pour les falaises rocheuses. Les conditions climatiques qui prévalaient lors des fortes périodes d'érosion devraient devenir habituelles dans le contexte du réchauffement climatique appréhendé. Combinées à la hausse du NMR pressentie, ces conditions devraient accroître la vitesse de recul des littoraux aux Îles-de-la-Madeleine (Bernatchez *et al.*, 2008).

Artificialité des côtes

Les côtes artificielles représentent seulement 1,5 % du littoral des Îles-de-la-Madeleine. Dans le secteur de Havre-Aubert – Cap-aux-Meules, c'est 13,8 % du littoral qui est artificialisé, soit 6,6 km. Le principal effet de ces zones enrochées ou bétonnées est la réduction de la largeur de la plage ainsi que son abaissement (Bernatchez *et al.*, 2008). Ultimement, la base de la structure rigide est envoyée même à marée basse. Cette situation inhibe la fonction naturelle de la plage d'absorber l'énergie des vagues et favorise le risque de submersion de l'arrière-côte lors des événements de tempête (Bernatchez *et al.*, 2010).

Les impacts individuels de chacun de ces processus naturels sur la position de l'interface eau douce/eau salée et sur le volume de l'aquifère à long terme sont décrits dans la figure 5 du Chapitre 1. Les conséquences cumulées de chacun de ces processus sur les ressources en eau douce souterraine des Îles-de-la-Madeleine sont peu connues. C'est pour combler ce manque de connaissance que le service d'aménagement et des eaux souterraines du MDDEFP a mis en œuvre, dans le cadre du Plan d'action 2006 – 2012 sur les changements climatiques, un programme de suivi de niveau piézométrique aux Îles. D'autres actions sont aussi en développement afin de mieux appréhender et gérer ces changements à moyen et long terme (*cf.* Chapitre 3).

2.3.2 Les pressions anthropiques

L'utilisation des eaux souterraines pour des fins de consommation humaine comporte plusieurs avantages, notamment l'obtention d'une eau de grande qualité en quantité importante et qui demeure à température constante peu importe la saison (Oude Essink, 2001). De plus, les eaux

souterraines sont indépendantes des variations à court terme du régime des précipitations et de la composition chimique et microbiologique des eaux (IAEA, 2012). Avec l'accroissement de la population mondiale, on assiste en même temps à l'augmentation de la pression sur la ressource en eau, particulièrement l'eau des aquifères comme ceux des Îles-de-la-Madeleine. En général, les pressions anthropiques s'exercent principalement via le captage de l'eau à des fins de consommation domestique, agricole, énergétique et industrielle. Ces pressions peuvent avoir d'importants impacts sur la qualité et la quantité de l'eau qui circule dans les aquifères côtiers.

Aux Îles-de-la-Madeleine, la seule source d'eau potable est celle contenue dans les formations aquifères. Selon le système de classification des eaux souterraines (MENV, 1999), la ressource est classée comme étant irremplaçable (*cf.* Chapitre 3, Section 3.1). Par conséquent, l'identification des pressions actuelles et potentielles sur ces aquifères est primordiale.

2.3.2.1 Contaminants

Plusieurs sources de contaminants potentiels risquant d'atteindre la nappe phréatique ont été identifiées aux Îles-de-la-Madeleine. Le groupe Madelin'Eau (2004) en a dressé une liste exhaustive dont voici le résumé : les cimetières, les fausses septiques, les puits privés, les exploitations agricoles (principalement via les engrais chimiques et organiques), les produits phytosanitaires, les stations-services, les zones commerciales et industrielles, les lieux d'entreposage de carcasses d'automobiles ainsi que les dépôts de déchets clandestins. Mentionnons aussi la présence d'environ 200 000 sacs contenant du sable et du mazout contaminé aux biphényles polychlorés (BPC) provenant du naufrage de l'Irving Whale en 1970. Ces sacs, qui ont été enfouis dans les dunes des Îles, refont périodiquement surface. En 2008, 758 sacs ont été retrouvés suite à l'érosion des dunes de la Pointe-aux-Loups (Garde Côtière Canadienne, 2010). Par contre, une étude récente du ministère de Pêches et Océans Canada montre que les niveaux de contamination actuels par les BPC dans les crustacés et les mollusques prélevés près du secteur de Dune du Nord, où sont enterrés les sacs, sont très faibles et ne sont pas différents de ceux observés chez les mêmes espèces prélevées dans le secteur Dune du Sud (Lebeuf & Chagnon, 2011). Dans le dernier schéma d'aménagement des Îles-de-la-Madeleine (Agglomération des Îles-de-la-Madeleine, 2010), sept sites contaminés et non réhabilités sont identifiés (tableau 2.3), dont le site d'entreposage de BPC et la centrale au diésel d'Hydro-Québec.

Finalement, un apport accru des contaminants à la nappe phréatique par diffusion est possible dans une situation qui combinerait une augmentation locale des émissions atmosphériques des polluants, en raison de la croissance industrielle et urbaine, et un accroissement du taux annuel des précipitations puisque la recharge des aquifères est liée directement à ces précipitations.

2.3.2.2 Le captage d'eau souterraine

Lors du pompage à partir d'un puits individuel, un cône de dépression se crée sur la surface **piézométrique**, alors que l'exploitation d'un groupe de puits entraîne la création d'une zone de dépression à la surface de la nappe. Dans les deux cas, la trajectoire des lignes de courant de la nappe se trouve modifiée (figure 2.14). La forme et le degré de déformation du champ d'écoulement varient en fonction de la profondeur du puits et du débit de pompage. On parle de surexploitation uniquement si la quantité d'eau pompée excède la quantité d'eau qui entre dans le système via les précipitations (recharge). Dans leur étude sur les aquifères côtiers nord-américains, Ferguson & Gleeson (2012) mentionnent que le pompage excessif de la nappe aurait d'ailleurs plus d'impact sur l'intrusion saline que la hausse du niveau marin. Dans sa thèse, Comte (2008) mentionne qu'il y a déjà eu des épisodes d'intrusions salines aux Îles-de-la-Madeleine en réponse à une surexploitation ou une mauvaise extraction des eaux souterraines. Par exemple, dans les années 2000, suite à un pompage soutenu des puits de l'usine Madelimer, il y a eu une remontée du cône d'eau salée dans la lentille d'eau douce. Depuis l'incendie de 2007 qui a détruit l'usine Madelimer, ce sont deux usines de transformation des produits marins qui ont vu le jour en 2009 (secteur de Gros-Cap) et 2011 (secteur de Grande-Entrée) et qui exercent une pression sur les eaux souterraines. Avant l'avènement des plans de gestion et d'urbanisation, l'absence de planification a entraîné une répartition spatiale de la population et des captages quelque peu anarchiques (Falaise, 1959), ce qui aurait créé une pression inégale sur les aquifères et une remontée des eaux salines dans la lentille d'eau douce.

Tableau 2. 3. Liste des terrains contaminés et non réhabilités de l'agglomération des Îles-de-la-Madeleine (modifié du Schéma d'aménagement et de développement des Îles-de-la-Madeleine, 2010).

Liste des terrains contaminés et non réhabilités	Localisation	Liste des contaminants dans le sol
Ancien dépôt local pétrolier Irving	Grande-Entrée	Benzène Éthylbenzène Hydrocarbures C10 à C50 Toluène-Xylènes (o, m,p)
Banque Nationale, site d'entreposage de BPC	L'Étang-du-Nord	Biphényles Polychlorés (BPC) Hydrocarbures pétroliers C10 à C50
Centrale diesel Hydro-Québec	L'Île d'Entrée	Hydrocarbures pétroliers C10 à C50
Gestion des sacs de sable contaminés	Dunes de sable à l'ouest de Fatima	Biphényles Polychlorés (BPC) Hydrocarbures Produits pétroliers
Impérial		Hydrocarbures pétroliers C10 à C50
Irving station-service du port	Cap-aux-Meules	Hydrocarbures légers et hydrocarbures pétroliers C10 à C50
Office municipal d'habitation de Havre-Aubert	Havre-Aubert	Hydrocarbures pétroliers C10 à C50

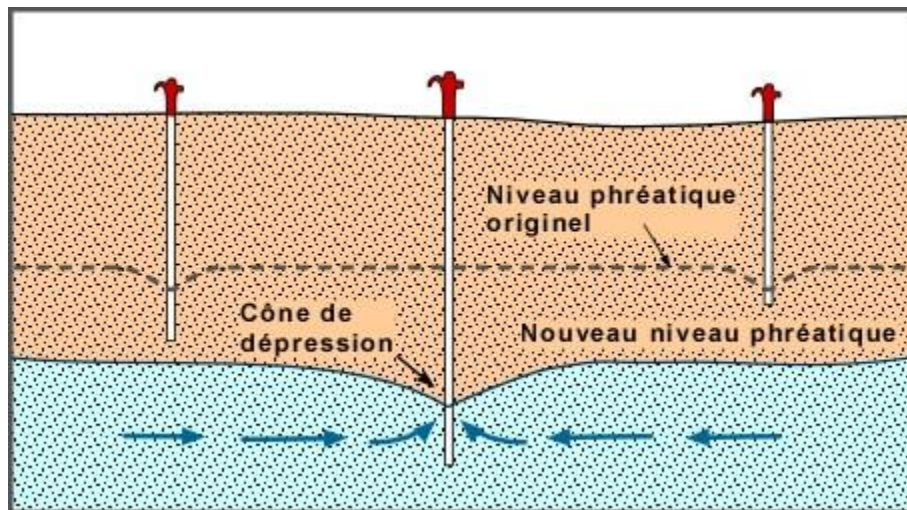


Figure 2. 14. Déformations caractéristiques des lignes de courant dans un aquifère au voisinage de puits (cône de dépression) (tirée de Université LAVAL, 2012 (b)).

La subsidence représente la seconde conséquence majeure d'une surexploitation de l'eau souterraine. Ainsi, dans les aquifères à grains fins, non consolidés, silteux et argileux, un débalancement du système recharge/décharge peut entraîner une diminution de pression, ce qui a pour conséquence de modifier la tension entre les grains, créant de la subsidence. Il est important

de mentionner que même si la surexploitation ne dure qu'un moment, l'état de détérioration, lui, perdure, car les déformations plastiques priment sur les déformations élastiques (IAEA, 2012).

Mentionnons que les sols meubles sont plus sensibles à ce type de subsidence que les roches consolidées comme le grès. À ce jour, aucun cas de subsidence lié au pompage de l'eau souterraine n'a été relevé aux Îles-de-la-Madeleine. En réglementant l'étalement urbain, l'installation de zones de captage et les débits de pompage, la Municipalité des Îles met tout en œuvre pour limiter les problèmes d'intrusion saline (*cf.* Chapitre 3).

2.3.2.3 L'exploitation minière

Selon la directive 019 sur l'industrie minière (MDDEP, 2012), des mesures visant la protection et la conservation des eaux souterraines doivent être mises en place lors de tout type d'exploitation minière. L'exploitation minière, qu'elle soit métallifère ou non, exige généralement le pompage d'une grande quantité d'eau et la création de puits de **rabattement**. L'extraction et le traitement du minerai requièrent généralement l'utilisation d'eau, qui est ensuite recyclée. Une partie de l'eau est réutilisée pour le fonctionnement de la mine et le reste est rejeté dans les plans d'eau de surface sans dépasser l'étape de l'épuration primaire. Lorsque l'extraction est terminée, les galeries sont ensuite remplies d'eau, ce qui a pour conséquence de détourner encore plus l'écoulement normal des eaux souterraines et de surface (Ressources Naturelles Canada, 2012). La superficie du rabattement de la nappe dépend de la composition du sol, de la profondeur de la mine et de la configuration du gisement. Ainsi, il est possible qu'au début d'une exploitation, les puits environnants ne soient pas touchés, mais avec le temps, si la profondeur et la superficie de la mine augmentent, il est possible que le rabattement de la nappe affecte les zones de captage (SESAT, 2009). Comme le démontre la figure 2.15, la superficie de rabattement de la nappe n'est pas symétrique, ce qui implique qu'une zone de pompage située près de la mine peut ne pas être affectée alors qu'une zone éloignée le sera.

Aux Îles-de-la-Madeleine, les Mines Seleine exploitent depuis 1983 un gisement de sel gemme souterrain qui est situé à plus de 223 m sous la mer. Ce gisement s'étend à plus d'un kilomètre sous la dune du Nord (Gagnon, 1998). Les techniques d'extraction minière traditionnelles décrites ci-dessus y sont utilisées, engendrant une pression supplémentaire sur les eaux souterraines de l'archipel. Par contre, le minerai est traité à sec, ce qui diminue considérablement la quantité d'effluents générés par l'exploitation (Gagnon, 1998). Outre l'inondation de galeries en 1995 par

infiltration de la nappe phréatique, accompagnée de mouvements de terrain, il ne semble pas y avoir eu de problèmes majeurs depuis le début de l'exploitation de la mine.

Des travaux ont mis en lumière plusieurs environnements structuraux et stratigraphiques favorables à la formation de gisements d'hydrocarbures dans le bassin de Madeleine. Le potentiel d'exploitation de gaz naturel sur le territoire madelinien pourrait aussi représenter une pression sur les réservoirs aquifères, étant donné les activités de forage et de stockage potentielles qu'une exploration/exploitation de ce genre implique (cf. Chapitre 4). L'impact spécifique de l'exploitation de la mine de sel ainsi que celui de l'exploration/exploitation gazière sur les eaux souterraines sera traité plus en profondeur dans le Chapitre 4.

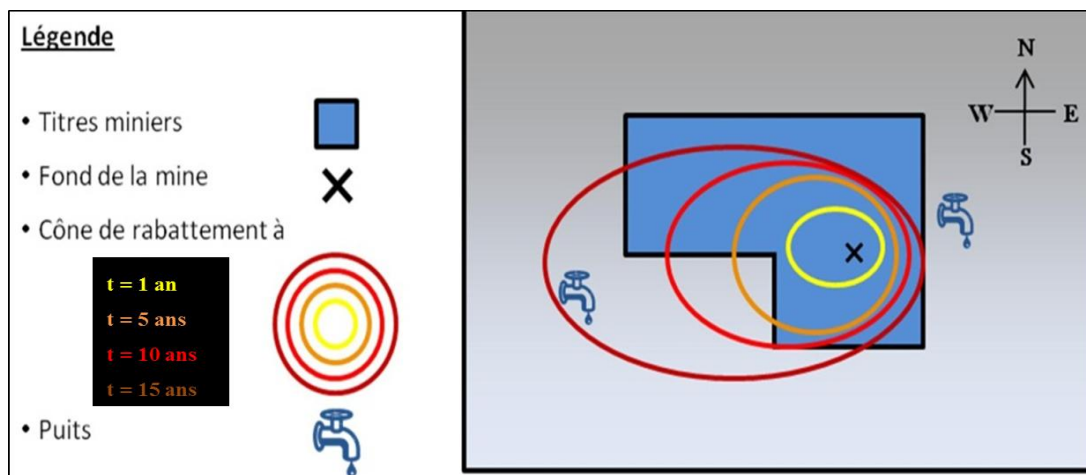


Figure 2. 15. Exemple de l'augmentation de la superficie de rabattement d'une nappe sur 15 ans induite par une exploitation minière (tirée de SESAT, 2009).

FAITS SAILLANTS

- ➔ L'histoire géologique des Îles-de-la-Madeleine est complexe. Elle a permis la mise en place de formations rocheuses dont les caractéristiques lithologiques en font des aquifères efficaces. Le Membre de l'Étang-des-Caps (ou grès rouge) est l'aquifère exploité par les captages municipaux sur les îles de Havre-Aubert, de Cap-aux-Meules et de Havre-aux-Maisons;
- ➔ L'histoire quaternaire depuis la dernière glaciation s'est traduite par la mise en place de sédiments meubles au-dessus des aquifères. La porosité de ces dépôts, leur faible étendue et leur faible épaisseur semblent avoir peu d'impact sur le cycle hydrogéologique. À l'échelle locale, dans les secteurs où ils sont plus épais, les dépôts meubles pourraient cependant avoir un rôle hydrologique non négligeable;
- ➔ Les dépôts meubles holocènes (tombolos) couvrent pratiquement la moitié du territoire. Ils représentent une réserve potentielle d'eau jugée importante, mais leur proximité au littoral et la hausse du niveau marin relatif les rendent très vulnérables à la **salinisation**;
- ➔ La majorité du territoire est recouverte par des sols acides appartenant aux ordres podzoliques et régosoliques. Ces sols perméables laissent l'eau s'infiltrer facilement vers les grès rouges sous-jacents. Rappelons qu'il n'y a aucune information pertinente sur l'impact hydrologique des podzols à ortstein (horizon induré). À notre connaissance, il y a peu d'information aux Îles-de-la-Madeleine sur les liens entre l'occupation du sol et la composition chimique (géochimique) des eaux souterraines;
- ➔ L'occupation des sols a beaucoup évolué ce dernier siècle. Plus de la moitié du territoire est soit en zone de conservation, soit en zone rurale. L'augmentation de l'urbanisation a accru les besoins en eau douce et potable tout en augmentant la superficie des zones imperméables;
- ➔ Du fait de son insularité, le territoire des Îles-de-la-Madeleine est soumis à de nombreux forçages externes (naturels) et internes (anthropiques) qui influencent directement ou indirectement les ressources en eaux souterraines. La Figure 2. 16 résume ces forçages.

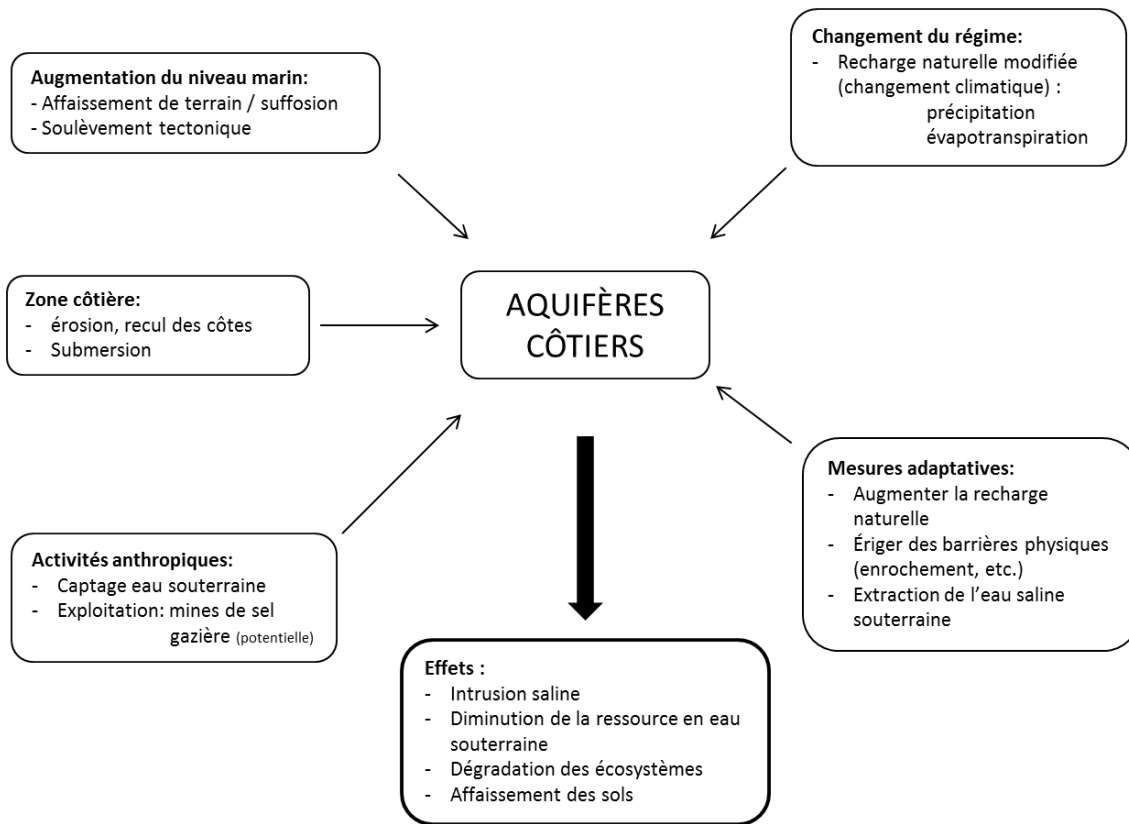


Figure 2. 16. Résumé des pressions et des contraintes qui affectent les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine (modifiée d'Oude Essink, 2001).

2.4 RÉFÉRENCES

- Agence régionale de mise en valeur des forêts privées de la Gaspésie - Les Îles. Plan de protection et de mise en valeur de la forêt privée Gaspésie - Les Îles, chapitre 9 – les Îles-de-la-Madeleine. pp. 620-701.
- Agglomération des Îles-de-la-Madeleine. (2010). Schéma d'aménagement et de développement révisé, 314 p.
- Agriculture et agroalimentaire Canada. (visité : 2012). Images de pédo-paysages : des provinces de l'Atlantique. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/images/at/index.html>.
- Allègre, C. & Dars, R. (2009). La géologie. Passé, présent et avenir de la Terre. Belin - Pour la Science, Paris, 302 p.
- Anonyme. (1999). Planification stratégique – Îles-de-la-Madeleine – État de la situation. Résumé aux fins du Sommet Régional Gaspésie/Îles-de-la-Madeleine présenté par la Commission sectorielle «Environnement – Îles». 7 p.
- Barr, S.M., Brisebois, D. & Macdonald, A.S. (1985). Carboniferous volcanic rocks of the Magdalen Islands, Gulf of St. Lawrence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22: 1679-1688.
- Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Herrera, I. & Ouazar, D. (1999). Seawater intrusion in coastal aquifers: concept, methods and practices. Kluwer Academic Publishers, London, 625 p.
- Bernatchez, P. & Dubois, J.-M.M. (2008). Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediment shorelines in a cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Quebec. *Journal of coastal research*, 24: 169-180.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. & Morissette, A. (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 256 p.
- Bernatchez, P., Toubal, T., Van-Wierts, S., Drejza, S. & Friesinger, S. (2010). Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, Îles-de-la-Madeleine. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, avril 2010, 177 p.
- Brahy, V. & Loyer, S. (visité : 2012). L'imperméabilisation et la compaction des sols. <http://environnement.wallonie.be>.
- Brisebois, D., (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, DPV-796. 48 p.
- Bruand A. & Coquet Y. (2005). Les sols et le cycle de l'eau. In Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. & Morel J.L. (eds.): *Sols et Environnement*. Dunod, Paris, pp. 345-363.
- Castany G. (1998). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris, 236 p.
- Cazenave, A., Lombard, A. & Llovel, W. (2008). Present-day sea level rise: a synthesis. *Geoscience*, 340: 761-770.

- Comte, J.-C. (2008). Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements denses dans les aquifères côtiers. Application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal). Thèse de doctorat, Académie d'Aix-Marseille, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 198 p.
- Consortium en foresterie Gaspésie - Les Îles. (2008). Bilan forestier régional basé sur les connaissances, Gaspésie - Les Îles, 227 p.
- Dredge, L.A., Mott, R.J. & Grant, D.R. (1992). Quaternary stratigraphy, paleoecology, and glacial geology, Îles-de-la-Madeleine, Québec. *Canadian Journal of Earth Science*, 29: 1981-1996.
- Dubois, J.M.M. (1992). Le paysage naturel et son évolution. *Infogéographes*, 1: 41-49.
- Duchaufour, P. (2001). Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. In *Abrégé de pédologie*. 6^e éd., Dunod, Paris, 331 p.
- Falaise, N. (1959). L'habitat aux Îles-de-la-Madeleine. *Cahier de géographie du Québec*, 3(6): 209-221.
- Ferguson, G. & Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, vol. 5: 342-345.
- Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. & Ketch, L.A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210: 169-204.
- Foucault, A. & Raoult, J.-F. (2010). *Dictionnaire de géologie*. 7^e éd., Dunod, Paris, 382 p.
- Gagnon, M. (1998). Bilan régional Îles-de-la-Madeleine, Zone d'intervention prioritaire 21. Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, région du Québec, 102 p.
- Garde côtière canadienne. (2010). Cas de pollution suite au naufrage de l'Irving Whale survenu en 1970. Plan d'action visant à l'actualisation de la stratégie d'intervention en matière de gestion des sacs enfouis dans les dunes des Îles-de-la-Madeleine, 83 p.
- Gehrels, W.R., Milne, G.A., Kirby, J.R., Patterson, R.T. & Belknap, D.F. (2004). Late Holocene sea-level changes and isostatic crustal movements in Atlantic Canada. *Quaternary International*, 120: 79-89.
- Grandtner, M.M., (1966). Les ressources végétales des Îles-de-la-Madeleine. Fonds recherche forestière Université Laval, 53 p.
- Groupe de travail sur la classification des sols. (2002). *Le système canadien de classification des sols*. 3^e éd. Direction générale de la recherche, ministère de l'Agriculture et Agro-Alimentaire du Canada. Publication 1646, Ottawa (ON), 196 p.
- Howie, R.D. & Barss, M.S. (1975). Upper Paleozoic rocks of the Atlantic Provinces, Gulf of St. Lawrence, and adjacent continental shelf. In *Offshore geology of Eastern Canada*. Geological Survey of Canada, Paper 74-30 (2): 35-50.
- IAEA (visité : 2012). Chapitre 2 - Exploitation et surexploitation des eaux souterraines, 20 p. <http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/documents.pdf>.
- IPCC. 2007. Climate changes (2007): Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working group II to the fourth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P. van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A. & Woodworth, P.L. (2008). Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophysical Research Letters*, 35(8): L08715.
- Juneau, M.-N. (2012). Hausse récente du niveau marin relatif aux Îles-de-la-Madeleine. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 161 p.
- Koohzare, A., Vaníček P. & Santos M. (2006). Compilation of the map of recent vertical crustal movements in eastern Canada using GIS. *Journal of Surveying Engineering, ASCE*, 132(4): 160-167.
- La Flèche, M.R., Camiré, G. & Jenner, G.A. (1998). Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalens Islands, Québec, Canada. *Chemical geology*, 148: 115-136.
- Lebeuf, M. & Chagnon, M. (2011). Les biphényles polychlorés (BPC) dans les organismes et sédiments marins côtiers aux Îles-de-la-Madeleine; évaluation de la contamination par le mazout contenu dans les sacs enfouis dans les dunes. *Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, 2941 : viii + 49 p.
- Îles-de-la-Madeleine (visité : 2012) Informations générales.
<http://www.ilesdelamadeleine.com/fr/economie83.php>
- Madelin'Eau. (2004). Gestion des eaux souterraines aux îles de La Madeleine - Un défi de développement durable. Rapport présenté à la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine dans le cadre du FQADD et du FCM-FHMV, Décembre 2004, Groupe Madelin'Eau, 100 p.
- Maillet, J. (1992). Le sous-sol et les ressources minérales. *Infogéographes*, 1: 37-40.
- Marshak, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète*. 3e éd., de Boeck, Bruxelles, 833 p.
- Ministère de l'énergie et des mines du Nouveau-Brunswick (visité : 2012) Le bassin carbonifère des Maritimes. *in* ressources minérales et pétrolières,
http://www.gnb.ca/0078/minerals/GSB_Virtual_Carboniferous-f.aspx
- Ministère du Développement Durable et des Parcs (MDDEP).(visité : 2012). Directive 019 sur l'industrie minière, 95 p.
- Ministère de l'Énergie et des mines du Nouveau-Brunswick. (visité : 2012).
http://www.gnb.ca/0078/minerals/GSB_Virtual_Carboniferous-f.aspx.
- Ministère de l'environnement du Québec (MENV) (1999). Guide de classification des eaux souterraines du Québec, 12 p.
- McCulloch, M.M., Forbes, D.L. & Shaw, R.W. (2002). Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island. *Geological Survey of Canada*, Open File 4261.
- Oude Essink, G.H.P. (2001). Improving fresh groundwater supply – problems and solutions. *Ocean & coastal management*, 44: 429-449.
- Parkes, G.S., Forbes, D.L., & Ketch, L.A. (2006). Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale. In Daigle, R. (ed.): Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick. Environnement Canada, 646 p.
- Ptacek, C., Price, W., Smith, L.J., Logsdon, M., & McCandless, R. (2004). Pratiques et changements concernant l'aménagement du territoire - production minière et pétrolière dans Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario.

Rapport no. 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, no. 1, 148 p.

Rémillard, A.M., Héту, B. & Bernatchez, P. submitted. The Drift des Demoiselles on the Magdalen Islands (Québec, Canada): sedimentological and micromorphological evidence of a Late Wisconsinan glacial diamict. *Canadian Journal of Earth Sciences*.

Rémillard, A.M. (2011). Stratigraphie, sédimentologie et micromorphologie du Drift des Demoiselles, Île du Havre-Aubert, Îles-de-la-Madeleine, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 78 p.

Ressources Naturelles Canada. (visité : 2012). Eau douce : le rôle et la contribution de : Les minéraux et les métaux. <http://www.rncan.gc.ca/developpement-durable/eau-douce/2416>.

Ressources naturelles Nouveau-Brunswick. (visité : 2012). http://www.gnb.ca/0078/minerals/GSB_Virtual_Carboniferous-f.aspx.

Rivera, A., Allen, D.M., & Maathuis, H. (2004). Variabilités et changements climatiques – Eaux souterraines dans Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport no. 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, no. 1, 148 p.

Rizzetto F., Tosi L., Carbognin L., Bonardi M. & Teatini P. (2003). Geomorphic setting and related hydrogeological implications of the coastal plain south of the Venice Lagoon, Italy. In: Servat E, Najem W, Leduc C, Shakeel A (eds) *Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions*, IAHS Publications, vol 278: 463–470.

SESAT (Société de l'eau souterraine de l'Abitibi-Témiscamingue). (visité : 2012). http://www.sesat.ca/eau_menace.aspx.

Soltner, D. (2005). *Les bases de la production végétale. Tome I : le sol et son amélioration*. Coll. Sciences et techniques agricoles, Ste-Gemmes-sur-Loire, 472 p.

Strahler, A. & Strahler, A. (2005). *Physical Geography – Science and systems of the human Environment*. Von Hoffman Press Inc. Jefferson City, USA, 768 p.

Statistique Canada (visité : 2012) population et tourisme. *in* Profil d'écorégion: Îles-de-la-Madeleine, <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-002-x/2010003/part-partie3-fra.htm>.

Sylvestre, M. (1979). Étude par modèle mathématique des nappes souterraines de la Grosse-Île et de l'île de la Grande Entrée, Îles-de-la-Madeleine, rapport H.G.-12, Québec, Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service des eaux souterraines.

Tardif, L. (1967). Pédologies des Îles-de-la-Madeleine. Bulletin technique, ministère de l'Agriculture et de la colonisation 13, 51 p.

Tardif, L. (1978). Les possibilités d'utilisation agricole des sols Îles-de-la-Madeleine. Direction générale de la recherche et de l'enseignement, Agriculture Québec, 22 p.

Tita, G. & Richard, C. 2009. Vivre l'insularité. *Continuité*, 121: 32-35.

Université LAVAL (visité : 2012) (a). Le sel des Îles-de-la-Madeleine <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/sel.iles.madeleine.html>.

Université LAVAL (visité : 2012) (b). Les eaux souterraines. *in* Les ressources naturelles, <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/eaux.souterraines.html>.

Vigneault, B. (2012). Cadre lithostratigraphique quaternaire du nord des Îles-de-la-Madeleine. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 118 p.