

# Chapitre 3

## LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DES ILES-DE-LA-MADELEINE

*Gwénaëlle Chaillou, Thomas Buffin-Bélanger et Richard St-Louis*

# Chapitre 3 TABLE DES MATIÈRES

|   |            |
|---|------------|
| <b>CHAPITRE 3 LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE...</b>                               | <b>67</b>  |
| <b>CHAPITRE 3 TABLE DES MATIÈRES.....</b>   | <b>68</b>  |
| <b>3.1 LES EAUX SOUTERRAINES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE : UNE SOURCE .....</b>                                  | <b>69</b>  |
| <b>IRREMPLAÇABLE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE .....</b>  | <b>69</b>  |
| <b>3.2 FORMATIONS AQUIFÈRES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE .....</b>  | <b>70</b>  |
| <b>3.3 DYNAMIQUE DE RECHARGE DES AQUIFÈRES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE.....</b>                                  | <b>75</b>  |
| <b>3.4 HYDRODYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS .....</b>   | <b>80</b>  |
| 3.4.1 Modélisation des écoulements et des niveaux piézométriques .....  | 80         |
| 3.4.2 Caractéristiques hydrologiques globales .....   | 84         |
| 3.4.3 Vitesse de la recharge et temps de séjour de l'eau .....  | 86         |
| 3.4.4 Disponibilité en eau .....  | 86         |
| 3.4.5 Décharges d'eau souterraine aux écosystèmes aquatiques de surface.....                                  | 88         |
| <b>3.5 LES RISQUES DE CONTAMINATION PAR L'EAU SALÉE .....</b>   | <b>88</b>  |
| 3.5.1 Historique d'intrusion saline dans l'archipel.....  | 88         |
| 3.5.2 Exploitation de l'eau .....   | 89         |
| 3.5.3 Les pressions naturelles liées aux changements environnementaux globaux posent-elles un<br>risque?..... | 92         |
| <b>3.6 LES RISQUES DE CONTAMINATION À PARTIR DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES DE SURFACE .....</b>                  | <b>95</b>  |
| 3.6.1 Historique de contamination des nappes dans l'archipel .....  | 95         |
| 3.6.2 La délimitation des aires d'alimentation et des périmètres de protection.....                           | 96         |
| 3.6.3 Évaluation de la vulnérabilité à la contamination .....   | 99         |
| <b>3.7 LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES ET SON SUIVI .....</b>  | <b>103</b> |
| <b>FAITS SAILLANTS .....</b>  | <b>105</b> |
| <b>3.8 RÉFÉRENCES .....</b>   | <b>106</b> |

*« La conception moderne des eaux souterraines est l'aboutissement de sept millénaires de cheminement de la pensée, jalonnés de paliers, de stagnations et de mûrissements suivis d'explosions d'idées. En revanche, la technique du captage et de l'utilisation de l'eau, anticipant sur les connaissances scientifiques, a connu ses premières applications pratiques il y a cinq mille ans »*

*Comité français d'histoire de la géologie, séance du 27 février 1991*

---

L'hydrogéologie est une science multidisciplinaire qui repose sur la connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines. L'hydrologie applique aussi ces connaissances à la prospection, au captage, à l'exploitation, à la protection et à la gestion des réserves d'eaux souterraines. Un intérêt particulier est aussi porté sur la relation entre l'environnement géologique et la géochimie de l'eau, sa qualité et son accumulation.

Ce chapitre présente les principaux processus physiques contrôlant la dynamique, la quantité et la qualité des eaux souterraines disponibles aux Îles-de-la-Madeleine. En nous basant sur les différentes études réalisées ces dernières décennies, et particulièrement sur celles réalisées par le groupe Madelin'Eau mandaté par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, nous décrivons d'abord les composantes du cycle hydrologique contribuant à la dynamique des eaux souterraines, puis nous nous intéressons à l'histoire de la **contamination** des eaux souterraines et aux principaux risques actuels de contamination.

### **3.1 LES EAUX SOUTERRAINES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE : UNE SOURCE IRREMPLAÇABLE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE**

L'alimentation en eau potable de la population des Îles-de-la-Madeleine se fait exclusivement à partir de l'eau souterraine. En plus des nombreux puits individuels (10 % de la population), les Îles comptent trois réseaux de distribution municipaux : Havre-Aubert, Havre-Aux-Maisons et Île Centrale (Cap-aux-Meules - Étang-du-Nord et Fatima). Un quatrième est présentement en construction sur l'île de Grande-Entrée et devrait être complété vers la fin de 2013. À ces réseaux s'ajoute un poste d'approvisionnement saisonnier situé à Pointe-de-Grande-Entrée. Les trois réseaux principaux et celui en construction desservent environ 11 000 personnes sur une base permanente. Ces réseaux sont alimentés avec de l'eau douce souterraine qui ne subit aucun traitement. Les résidents des Îles jouissent d'une eau douce souterraine d'une excellente qualité qui répond aux exigences du Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) et ce sans traitement, ou avec un traitement minimal (Ellis, 2012). Le Tableau 3. 1 présente une synthèse de

données sur la qualité de l'eau rapportées dans les rapports de Madelin'Eau (2004, 2011) pour les puits de captage.

La situation géographique des Îles-de-la-Madeleine fait en sorte que les eaux souterraines constituent l'unique source d'eau potable accessible aux Madelinots. La taille et la géomorphologie des Îles ainsi que la nature perméable des dépôts de surface et des roches impliquent que le réseau hydrographique des Îles a une étendue relativement limitée. Les cours d'eau non intermittents sont peu nombreux et à très faible débit et les plans d'eau douce sont peu volumineux. L'eau de surface ne peut, de ce fait, constituer une alternative pour l'alimentation en eau des populations. Par conséquent, s'il advenait, à la suite de problèmes de contamination ou d'intrusions salines (*cf.* Section 2.5), que l'eau douce souterraine ne soit plus disponible, l'eau de mer ou l'eau souterraine **saumâtre** deviendraient les seules sources possibles de remplacement. Cette situation impliquerait cependant la mise en place d'équipements de traitement beaucoup plus complexes que ceux utilisés actuellement et occasionnerait des coûts d'implantation et d'exploitation bien plus élevés, notamment sur le plan énergétique (Ellis, 2012).

Entourée d'eau salée et ne disposant que d'une faible quantité d'eau de surface, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine n'a donc d'autres choix que de recourir aux eaux souterraines pour subvenir à ses besoins en eau. **Les eaux souterraines constituent la seule et unique source d'eau potable disponible pour la population des Îles. De ce fait, elles représentent une ressource qui doit être qualifiée d'irremplaçable.** Suivant le Système de classification des eaux souterraines (MENV, 1999) utilisé au Québec, le caractère irremplaçable des eaux souterraines des Îles-de-la-Madeleine en fait une ressource de classe I (Tableau 3. 1). La Classe I suppose un degré de protection accru en termes quantitatif et qualitatif. De plus, le caractère hautement vulnérable de la ressource et la menace d'intrusions salines (*cf.* Sections 2.5 et 2.6) renforcent l'obligation de protection et de bonne gestion de la ressource ceci dans une perspective de développement durable.

### 3.2 FORMATIONS AQUIFÈRES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

La structure des réservoirs souterrains est associée à la géologie et à la stratigraphie des formations rocheuses et des dépôts meubles. Le Tableau 3. 2 résume les caractéristiques géologiques et hydrologiques des principales formations rocheuses des Îles selon Comte (2008), alors que la Figure 3. 1 présente la configuration spatiale de ces formations. La Figure 3. 1 présente également la distribution des puits municipaux. Cette distribution montre que les roches

du Membre de l'Étang-des-Caps (et plus accessoirement le Membre de L'Étang-du-Nord) appartenant à la Formation de Cap-aux-Meules (en orange sur la Figure 3. 1) constituent la formation **aquifère** principale captée par les puits municipaux sur les îles du Havre-Aubert, du Cap-aux-Meules, du Havre-aux-Maisons et de la Grande-Entrée. Les puits individuels, non identifiés sur la Figure 3. 2, sont pour la plupart également aménagés dans cette formation.

Tableau 3. 1 Système de classification des eaux souterraines (MENV, 1999).

| Classe       | Termes clés   |
|--------------|---|
| <b>I</b>     | Hautement vulnérable et irremplaçable pour une population substantielle ou vitale écologiquement.   |
| <b>II A</b>  | Source courante d'eau de consommation.  |
| <b>II B</b>  | Source potentielle d'eau de consommation.   |
| <b>III A</b> | N'est pas une source d'eau de consommation : degré de liaison hydraulique intermédiaire à élevé; de piètre qualité; ne peut être purifiée ou ne présente pas un potentiel suffisant en quantité ou ne peut pas être considéré d'un point de vue économique comme un substitut valable, en totalité ou en partie à la source actuelle d'approvisionnement. |
| <b>III B</b> | N'est pas une source d'eau de consommation : faible degré de liaison hydraulique; de piètre qualité; et ne peut-être purifiée.  |

Plus simplement désignées sous l'appellation grès rouges, les roches du Membre de l'Étang-des-Caps constituent les seules roches capables de fournir de forts débits de pompage. Les grès rouges sont perméables de sorte que les eaux de précipitation (pluie et neige fondue) s'y infiltrent facilement. Ils contiennent et peuvent permettre la circulation de quantités importantes d'eau d'où leur qualité aquifère. Ils affichent des **transmissivités** de l'ordre de  $4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, des coefficients d'emmagasinement de 0,08 à 3 %, et des porosités cinématiques de 1 à 2,5 % (Tableau 3. 2). La Figure 3. 2 présente la géologie et les caractéristiques hydrologiques de deux puits appartenant au Réseau d'Information sur les Eaux souterraines (RIES) situés à Havre-aux-Maisons et à Grosse-Île. L'étendue spatiale (latérale et verticale) de la formation des grès rouges (Figure 3. 1 et Figure 3. 2), ainsi que ses caractéristiques hydrologiques (Figure 3. 2; Tableau 3. 2) en font un aquifère idéal. La profondeur de la **nappe d'eau** dans ces grès varie selon les secteurs, mais l'eau se trouve généralement près de la surface (quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Cette accessibilité à la ressource en fait un aquifère adéquat pour l'exploitation.

Contrairement aux grès rouges, les roches du Groupe de Windsor (en brun sur la Figure 3. 1) sont peu perméables. Les zones occupées par ces roches favorisent le ruissellement de surface et l'**écoulement hypodermique**. Comme ces zones possèdent des dénivelés prononcés, ces

écoulements contribuent directement à l'alimentation de l'aquifère des grès rouges qui les ceinturent. Une partie de l'eau s'infiltré dans les grès rouges au niveau de la zone de contact entre les deux groupes géologiques et l'autre partie s'écoule vers l'océan ou les lagunes par le réseau de drainage de surface.

Tableau 3. 2. Résumé des caractéristiques géologiques et hydrologiques des principales formations rocheuses et meubles des Îles-de-la-Madeleine (modifiée de Comte 2008; d'après Brisebois, 1981 et Sylvestre, 1979).

| <b>Géologie (Brisebois, 1981)</b> |  | <b>Hydrogéologie (Sylvestre, 1979)</b> |   |                 |  |
|-----------------------------------|--|--|---|-----------------|--|
| Formation                         | Lithostratigraphie   | Puissance (m)                          | Transmissivité moyenne $\cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ | Débit moyen L/s | Risque de contamination (intrusion saline ou pollution de surface) |
| Quaternaire                       | Sable de plage (dunes) et tombolos   | 0 – 15+                                | 0.9 – 1.7   | 15              | Très élevé   |
|                                   | Argiles, sables, graviers, glaciaires  | 1 – 60+                                | 0.09  | 0.08            | Élevé  |
| Membre de l'Étang-des-Caps        | Grès et siltstones à laminations obliques géantes  | 600+                                   | 1.7 – 3.5   | 30              | Très élevé   |
| Membre de L'Étang-du-Nord         | Grès, siltstones, mudstones, conglomérats et calcaires   |  | 0.09  | 0.08            | Élevé ou modéré  |
| Formation du Cap-au-Diable        | Basaltes, roches pyroclastiques, calcaire cristallin   | 15-60+                                 | 0.2   | 0.4             | Faible   |
| Formation du Havre-aux-Maisons    | Brèches d'effondrement, mudstones, siltstones, grès, calcaire, dolomie, gypse, anhydrite, basaltes, roches volcanoclastiques | 150+                                   | 0.001 – 0.09  | 0.01 – 0.05     | Faible   |

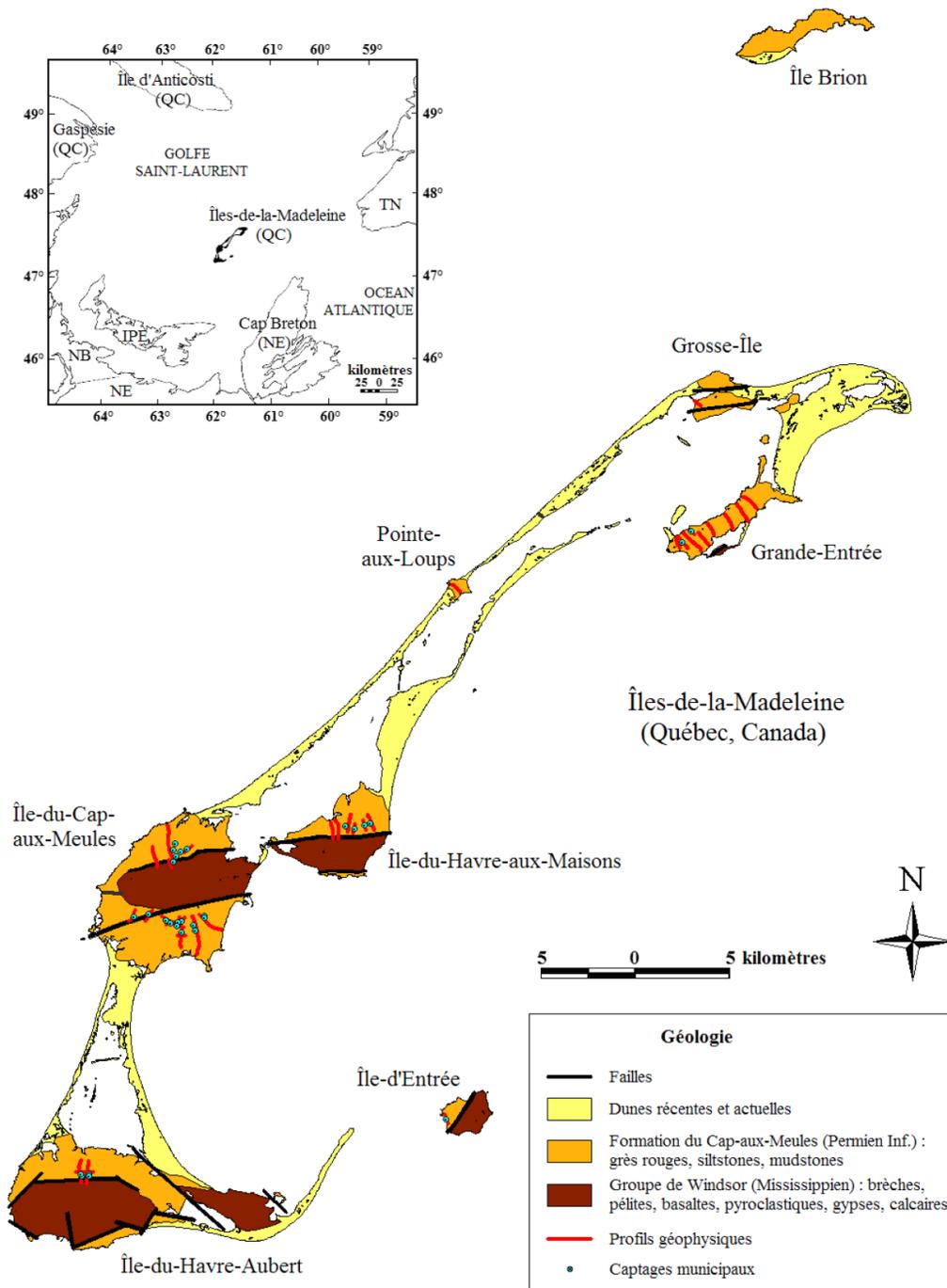


Figure 3. 1. Carte géologique simplifiée des Îles-de-la-Madeleine et localisation des puits de captage municipaux (tiré de la thèse de Comte (2008) et modifié de Brisebois (1981)).

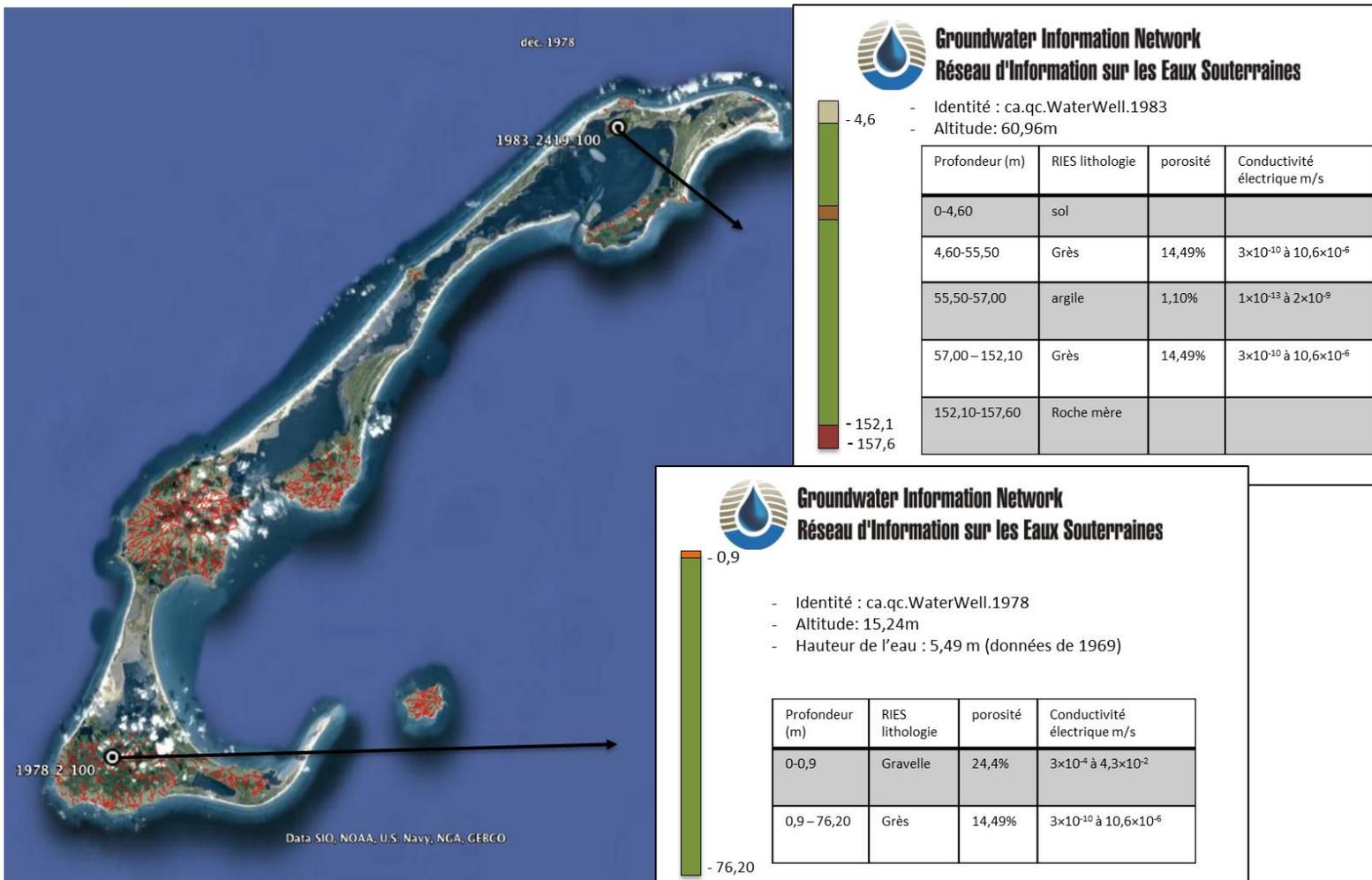


Figure 3. 2. Localisation et description de deux puits du RIES. La carte de localisation des puits montre le réseau hydrographique des Îles en tenant compte des cours d'eau intermittents (trait rouge). Les puits sont localisés et décrits sur le site du RIES à l'aide de fiches signalétiques telles que présentées sur cette figure. La lithologie, le détail de la taille des grains et les données de porosité et de conductivité hydraulique sont aussi accessibles à cette adresse (<http://gw-info.net/>).

### 3.3 DYNAMIQUE DE RECHARGE DES AQUIFÈRES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

La quantité d'eau stockée dans le réservoir aquifère des Îles peut être évaluée à partir de relevés géophysiques, de suivis des niveaux **piézométriques** et d'estimation des entrées d'eau dans le système aquifère et des sorties d'eau vers l'océan. Les levées géologique et géophysique permettent d'évaluer les niveaux d'imperméabilité et de déterminer les coefficients d'emmagasinement de la roche. Les suivis des niveaux piézométriques permettent d'évaluer la fluctuation des niveaux de la nappe, mais surtout d'évaluer la hauteur et le sens des mouvements de l'eau dans les aquifères. L'estimation des entrées d'eau concerne essentiellement les apports en eau provenant de la portion des précipitations qui s'infiltré pour alimenter les aquifères. Ensemble, ces éléments permettent de construire un bilan hydrogéologique et de déterminer les volumes d'eau dans les aquifères.

La recharge des aquifères se fait essentiellement par l'infiltration diffuse d'une partie des précipitations car on ne retrouve que peu d'étendues d'eau de surface sur les Îles. Leblanc (1994) a établi un taux moyen annuel de recharge des aquifères des Îles à partir de l'analyse des **battements de la nappe** observés à la station hydrologique de Boisville (Étang-du-Nord). Il a établi cette recharge à 230 mm/an pour l'année 1980 avec des valeurs moyennes de précipitation de ~ 900 mm/an (rendement légèrement supérieur à 25%). Poulin (1977) reportait des valeurs du même ordre pour Grosse-Île : une infiltration de 300 mm/an avec des valeurs de précipitation moyennes annuelles de ~ 909 mm/an (un peu plus de 33%). Le taux moyen annuel de recharge reporté pour l'archipel est généralement de 30% du régime de précipitation (Madelin'Eau, 2004; MDDEP, 2002).

Tout comme les conditions hydrométéorologiques, la recharge n'est pas constante dans l'année. La Figure 3. 3 illustre les recharges mensuelles documentées par Leblanc (1994) pour l'année 1980. La fin de l'automne et le début du printemps sont les deux périodes de recharge les plus importantes comptant chacune pour près de 35 % de la recharge annuelle. Ces périodes correspondent à des périodes de forte pluviométrie. Les saisons estivale et hivernale sont, par contre, des périodes à faibles valeurs de recharge (évapotranspiration et gel). Il existe un léger décalage entre l'arrivée au sol des précipitations, l'infiltration et la recharge de la nappe. Les suivis piézométriques de Madelin'Eau (2007, 2009) permettent d'illustrer la variabilité de ces décalages selon la position des puits et selon la saison. La Figure 3. 4 présente les fluctuations des niveaux piézométriques de deux puits sur l'île de Grande-Entrée, l'un situé dans le secteur sud

(A), l'autre dans le secteur nord (B). Ces deux suivis permettent d'illustrer la différence de décalage entre les précipitations et la recharge en ces deux puits: la recharge semble déphasée de 2 à 3 jours pour le puits dans le secteur sud en novembre 2006 alors qu'elle se fait la journée même pour le puits du secteur nord pour les mois d'avril et mai 2009.

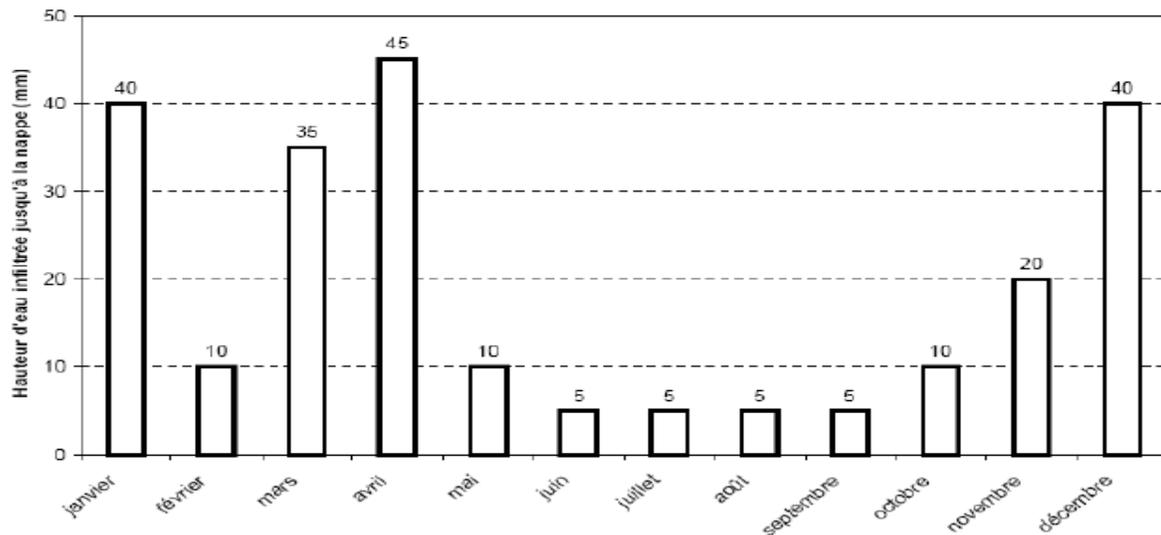


Figure 3. 3. Exemple de la dynamique des recharges des aquifères des Îles au cours de l'année 1980 selon Leblanc (1994). La somme des recharges mensuelles est de 230 mm/an, valeur utilisée dans les exercices de modélisation des écoulements souterrains en faisant l'hypothèse d'un régime permanent.

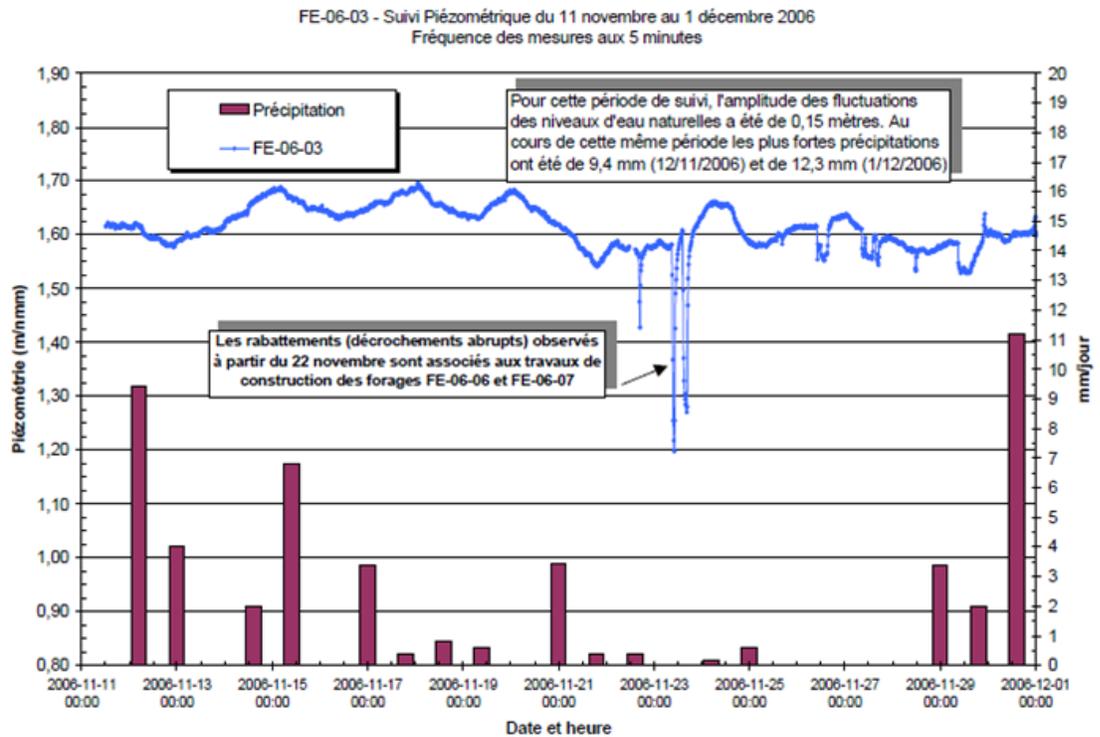
La recharge de l'aquifère varie annuellement avec les régimes annuels de température et de précipitation, mais elle peut aussi varier interannuellement avec les fluctuations des conditions climatiques. La Figure 3. 5 présente les fluctuations du niveau piézométrique à la station Boisville pour la période de 1968 à 1986. La figure révèle les fluctuations annuelles de la recharge déjà observée à la Figure 3. 3. Elle fait cependant ressortir des fluctuations cycliques importantes des niveaux piézométriques : les années 1974-1977 semblent moins humides que les années 1979-1982, par exemple. Ces fluctuations sont liées aux fluctuations des conditions hydrométéorologiques. En compilant les données de précipitation totale de 1983-1984 et 2010-2011 de la station d'Environnement Canada située aux Îles-de-la-Madeleine (secteur du Havre-aux-Maisons), nous observons une différence marquée dans le régime des précipitations : 870 mm/an à 1284 mm/an pour les années 1983-84 et 2010-11 respectivement. Cela représente une différence de 40 % (Figure 3. 6). Les fluctuations des niveaux piézométriques sont liées aux fluctuations des conditions hydrométéorologiques, mais aussi aux tendances climatiques.

Bernatchez *et al.* (2008) ont montré des tendances dans les températures moyennes annuelles (+ 1,9°C de 1985-2006) et dans l'intensité et le régime des précipitations (précipitation pluie + 1,7 mm/année de 1986-2007) (*cf.* Chapitre 2). Tout comme les fluctuations interannuelles, ces tendances dans les conditions hydroclimatiques sont susceptibles de modifier les conditions de recharge des aquifères. La valeur de recharge (30%) utilisée pour modéliser la dynamique hydrogéologique des aquifères aux Îles semble toujours basée sur l'estimation proposée par Leblanc (1994) pour une seule année de mesure (230 mm/an ou 30 %). Les variabilités annuelles et interannuelles, mais également les tendances observées dans les conditions hydroclimatiques supportent l'idée qu'une attention particulière soit portée à cette valeur de recharge dans l'analyse des volumes d'eau disponibles.

Comme expliqué dans le Chapitre 1, l'impact de la variabilité et des changements climatiques sur la recharge des aquifères côtiers est encore peu ou mal évalué. De plus, il semble que l'impact d'une augmentation de température sur les taux d'évapotranspiration soit plus important que l'impact des précipitations sur la recharge. Une meilleure connaissance des taux actuels de recharge pourrait permettre d'améliorer les modèles hydrodynamiques utilisés aux Îles-de-la-Madeleine. Une étude spécifique sur l'impact des changements climatiques déjà observés et futurs sur le cycle hydrogéologique aux Îles permettrait aussi d'ajuster le modèle et de faire des projections qui intègrent ces changements naturels et hors de contrôle.

Néanmoins, à partir des données existantes et en considérant la recharge à 230 mm/an, un bilan hydrologique annuel peut être proposé pour les Îles-de-la-Madeleine. La Figure 3. 7 illustre le cycle de l'eau aux Îles-de-la-Madeleine et quantifie les volumes d'eau en proportion associés à chacune des composantes du cycle. Les données disponibles indiquent qu'environ 30 % des eaux de précipitation s'infiltrent dans le sol pour alimenter la formation aquifère des grès rouges (Madelin'Eau, 2004). Le reste (70 %) correspond à la somme des quantités d'eau qui ruissellent et qui s'évaporent. Le taux de ruissellement ne semble pas connu de façon précise. L'eau qui s'infiltré est en partie captée par les puits d'eau potable de la municipalité (environ 12 % du 30 % qui s'infiltré) alors que le reste s'écoule vers la mer ou vers les cours d'eau, les milieux humides ou les lagunes. Le Tableau 3. 3 de la section 3.4 fournit des précisions quant aux quantités d'eau prélevées par les puits municipaux pour chacun des secteurs des Îles-de-la-Madeleine; il présente le bilan hydrogéologique en termes de volumes journaliers (Infiltration – Prélèvements – Sortie à la mer).

(A)



(B)

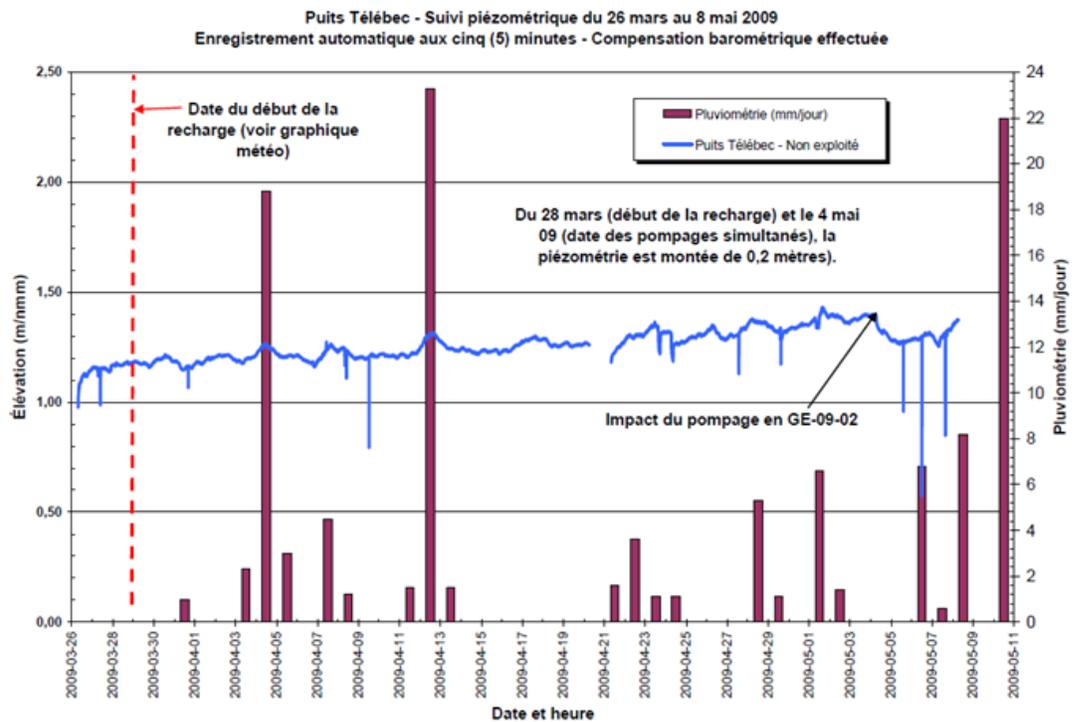


Figure 3. 4. Suivis piézométriques dans deux puits situés sur l'île de Grande-Entrée (A) secteur sud-est (B) secteur nord. La pluviométrie est indiquée. ((A) tirée de Madelin'Eau, 2007 et (B) tiré de Madelin'Eau (2009)).

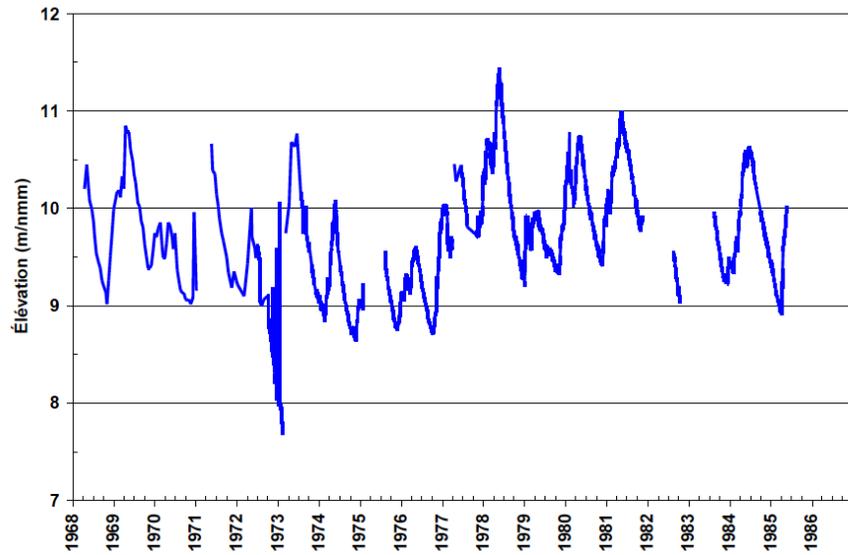


Figure 3. 5. Variation du niveau piézométrique de 1968 à 1986 à la station Boisville (Station 13007021 du MENV) du secteur de Cap-aux-Meules (tiré de Madelin'Eau, 2004).

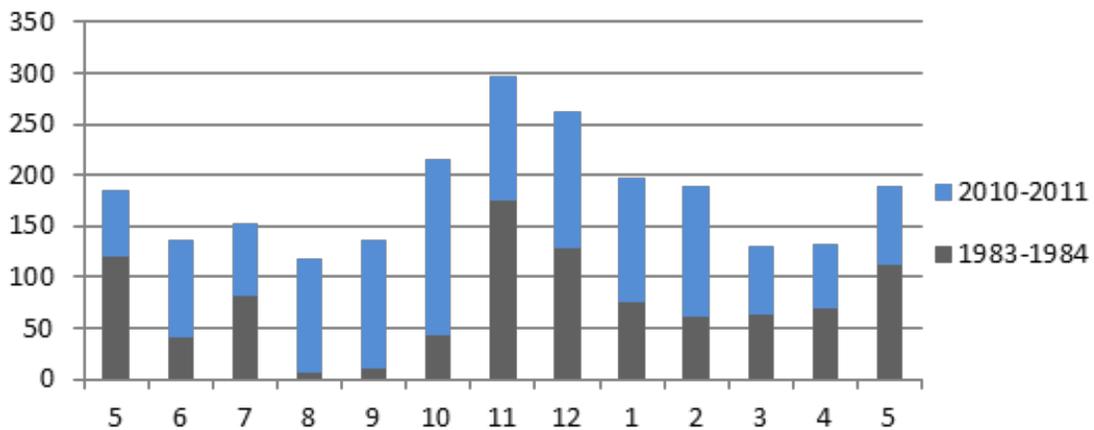


Figure 3. 6. Précipitations moyennes mensuelles de mai à mai sur la période 1983-1984 et 2010-2011. Compilation des données moyennes mensuelles de précipitation estimées à partir de la série temporelle hydroclimatique à la station météorologique d'Environnement Canada aux Îles-de-la-Madeleine.

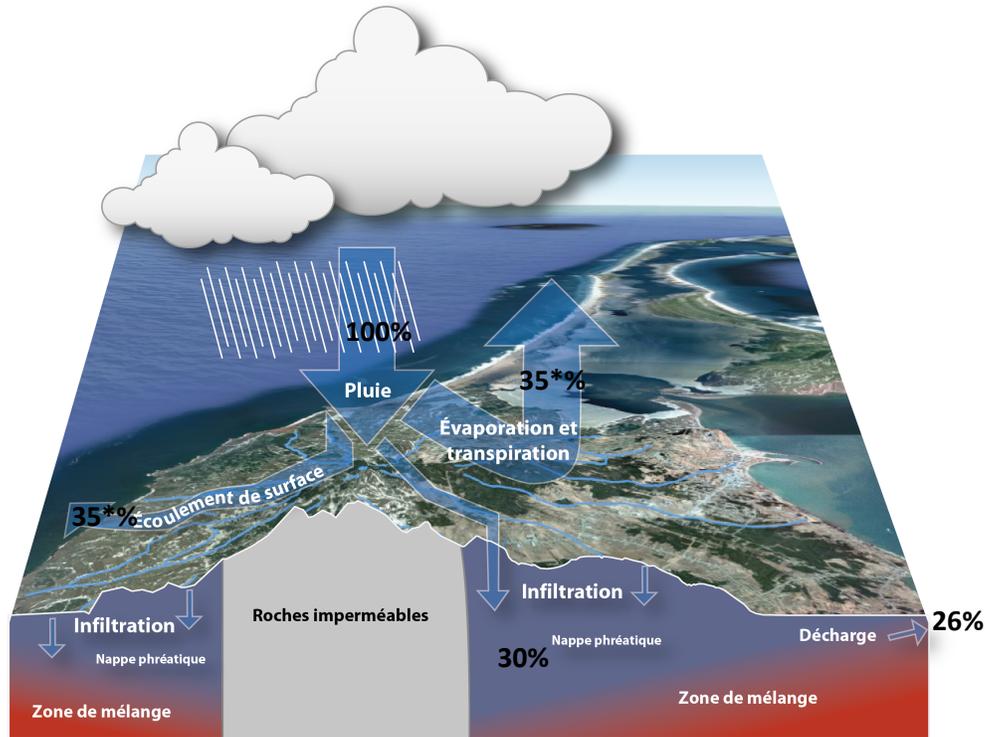


Figure 3. 7. Vue schématique du bilan hydrologique et de la recharge des aquifères aux Îles-de-la-Madeleine. Les prélèvements par les puits complètent le bilan avec un 4 % d'extraction.

### 3.4 HYDRODYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

#### 3.4.1 Modélisation des écoulements et des niveaux piézométriques

Les courbes de niveau piézométrique des îles du Havre-Aubert, du Cap-aux-Meules et du Havre-aux-Maisons possèdent une distribution circulaire autour du horst central. L'eau s'infiltre dans les failles subverticales au pied des horsts et l'écoulement se fait par un **gradient hydraulique** relativement faible du centre des Îles vers les lagunes et l'océan.

Pour modéliser les écoulements, comprendre la dynamique hydrologique et simuler des scénarios de pompage qui aident à la détermination des politiques de gestion des aquifères, les hydrogéologues utilisent des modèles numériques (Figure 3. 8). Aux Îles-de-la-Madeleine, le groupe Madelin'Eau a utilisé le modèle MODFLOW de l'USGS (U.S. Geological Survey). Ce modèle est l'un des plus utilisés pour simuler les écoulements souterrains en 3D et pour examiner l'effet des puits, des rivières, du drainage, de l'évapotranspiration et de la recharge sur les niveaux piézométriques et sur la dynamique de l'écoulement souterrain.

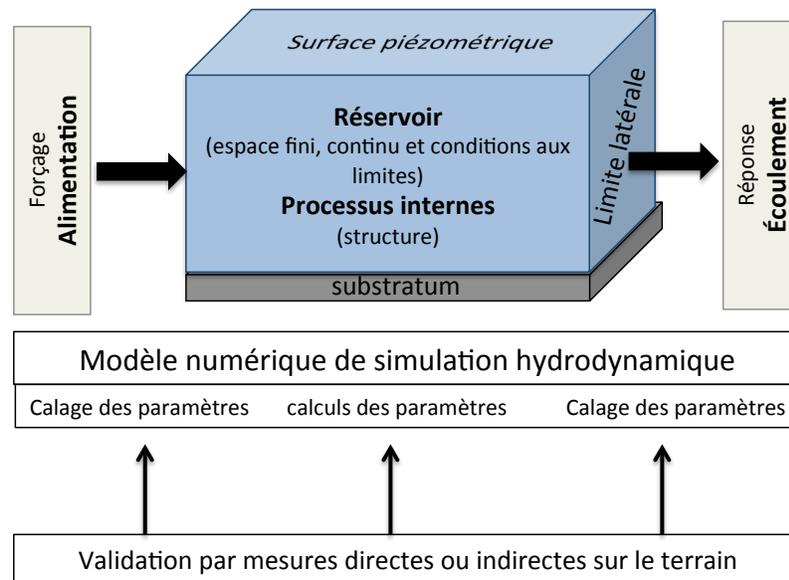


Figure 3. 8. Schématisation du principe de modélisation numérique des écoulements (modifiée de Castany, 1998).

Le modèle MODFLOW considère une seule et unique couche de matériau de densité fixe. La modélisation d'un mélange entre deux masses d'eaux de densités différentes (comme l'eau douce et l'eau de mer) est limitée. Le calcul des niveaux piézométriques permet cependant, avec la Loi d'équilibre de Ghyben-Herzberg, d'obtenir une valeur de l'élévation de l'interface eau douce/eau salée. Cette loi mathématique indique que l'interface est localisée à une profondeur égale à environ 40 fois la hauteur d'eau douce présente au-dessus du niveau de la mer, soit 40 fois la hauteur piézométrique. Un deuxième modèle (SUTRA) qui prend en charge les écoulements densitaires a été utilisé par le Groupe Madelin'Eau pour simuler les intrusions et localiser le **biseau salé**.

La première étape d'une modélisation consiste à paramétrer les entrées et les sorties afin que les valeurs utilisées soient « réalistes » et le plus similaire aux données observées. Ces données étant souvent éparses et peu nombreuses, des techniques indirectes comme la géophysique ou des essais de pompage permettent de les valider. Dans le cas des études de Madelin'Eau de 2003 et 2009, la recharge est fixée à 230 mm/an, les valeurs de transmissivité ont été validées par des essais de pompage dans les différents puits municipaux (Figure 3. 9), les valeurs de **porosité cinématique** ont été validées à l'aide des données de vitesse d'écoulement obtenues sur plusieurs

profils géophysiques, les niveaux des nappes modélisées ont été comparés avec les observations (Figure 3. 10), et la localisation des biseaux salés a été comparée avec les profils géophysiques. De nouvelles techniques de prospection géophysique ont d'ailleurs été développées plus récemment pour améliorer nos connaissances sur l'interface eau douce/eau salée sous et au pourtour de l'aquifère (Chouteau *et al.*, 2011; Comte, 2008 ; *cf.* Section 3.5.3). Cet exercice de comparaison est essentiel pour s'assurer de la validité des sorties du modèle, mais aussi de la sensibilité du modèle aux différents paramètres d'entrées. La Figure 3. 9 et la Figure 3. 10 suggèrent une bonne adéquation du modèle puisque les transmissivités reconstituées par le modèle opéré par Madelin'Eau (2007, 2009) sont dans les mêmes ordres de grandeur que les transmissivités estimées par les essais de pompage et que les fluctuations des niveaux piézométriques modélisés sont cohérentes et satisfaisantes lorsque comparées aux fluctuations observées des niveaux piézométriques. La validation par comparaison a été effectuée pour chaque île ainsi que pour des secteurs déterminés comme sur les îles du Havre-aux-Maisons et du Cap-aux-Meules.

Les sorties du modèle ont permis au groupe Madelin'Eau d'estimer :

- les temps de séjour et donc les périmètres de protection autour de chaque puits;
- la profondeur des aquifères;
- les niveaux piézométriques et donc la direction des écoulements;
- la position de l'interface eau douce/eau salée à partir des dômes piézométriques;
- les risques actuels de contamination par l'eau salée et les zones sensibles;
- la capacité de pompage et la simulation de possibles intrusions salines selon divers scénarios de pompage.

Madelin'Eau (2011) suggère néanmoins d'interpréter avec prudence les estimations provenant de la simulation, particulièrement celles réalisées pour la période estivale. Ils soulignent que cette prudence découle du fait que la variabilité temporelle (saisonnière et interannuelle) de la recharge et la variabilité du niveau de la mer (marées et évolution climatique) ne sont pas considérées. Les simulations correspondent à des conditions moyennes, autant pour la recharge que pour le pompage.

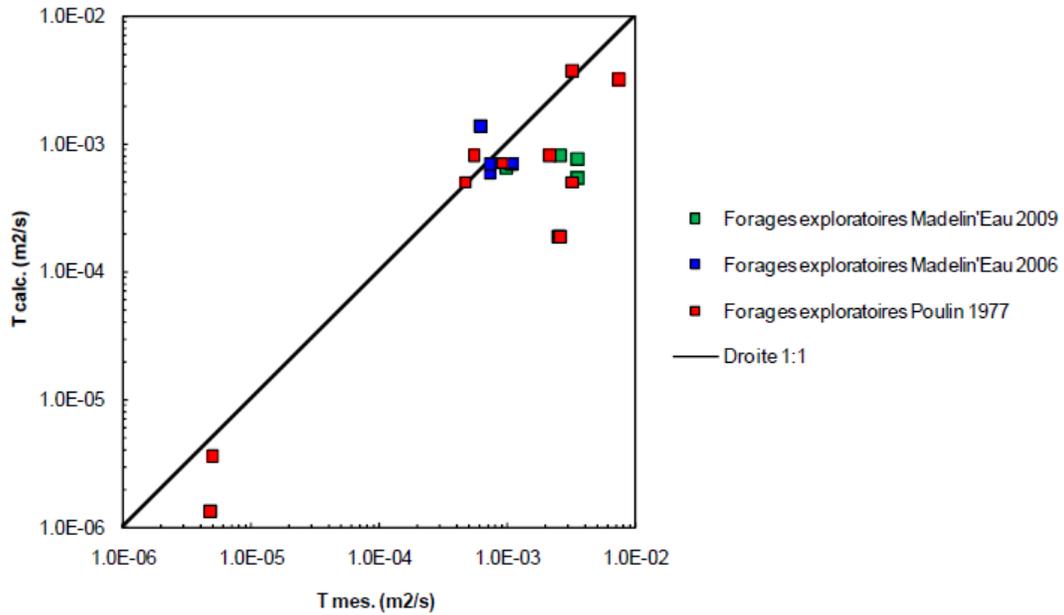


Figure 3. 9. Comparaison entre les transmissivités extraites du modèle opéré par Madelin'Eau et celles interprétées par les essais de pompage (tirée de Madelin'Eau, 2009)

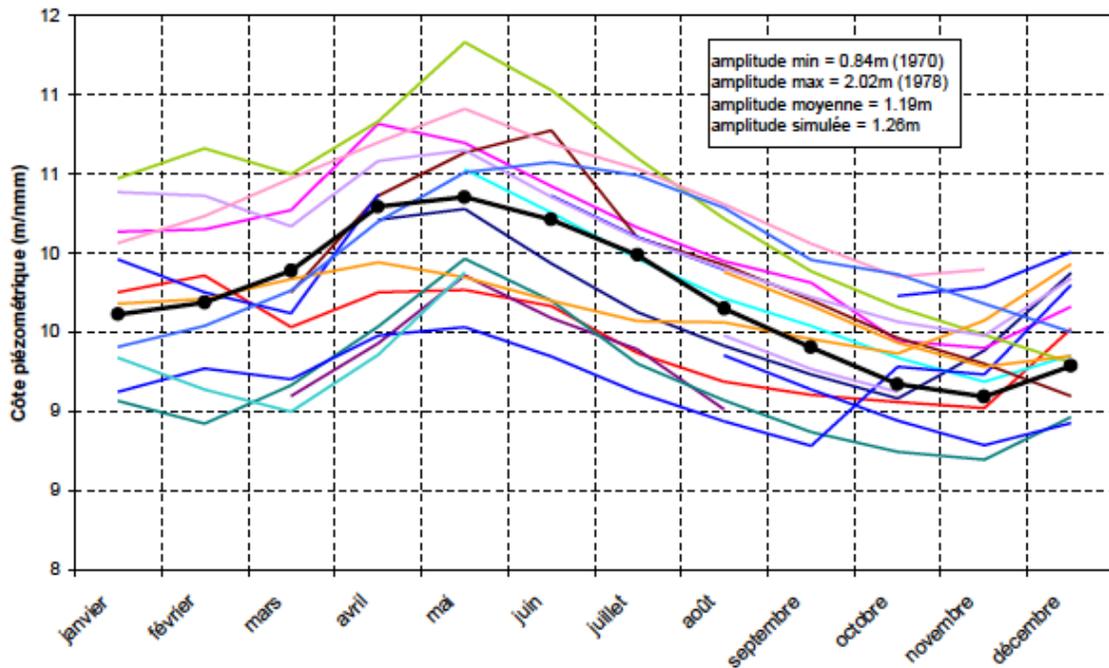


Figure 3. 10. Exemples de comparaisons des niveaux mensuels simulés par Madelin'Eau en 2004 (en noir) et mesurés (couleur) sur la période de 1968 à 1985 au puits de Boisville sur l'île du Cap-aux-Meules.

Les modèles de transport et d'écoulement ne concernent pas la simulation explicite des phénomènes de propagation de polluants dans les eaux souterraines. Ils se limitent à définir les lignes d'écoulement suivies par un polluant de type conservatif et **miscible**, c'est-à-dire que son parcours est convectif et se comporte comme une particule idéale (comme l'eau). La simulation complète des processus de transport de polluants non conservatifs nécessite des modèles géochimiques spécifiques qui considèrent les transformations et la spéciation des éléments (oxydation, réduction, dissolution, adsorption, précipitation, *etc.*). Un exemple de modèle géochimique largement utilisé dans le domaine est le PHREEC de l'USGS qui a aussi un modèle de transport unidimensionnel simple. Ce type de modèle n'a pas, à notre connaissance, été développé et utilisé pour les aquifères des Îles, probablement parce qu'il n'y a aucun cas de contamination d'eau du réservoir (problèmes de contaminations à l'arsenic, au plomb ou aux sulfures connus par d'autres aquifères de l'Amérique du Nord).

### 3.4.2 Caractéristiques hydrologiques globales

La Figure 3. 11 présente les résultats du modèle d'écoulement proposé par Madelin'Eau (2004) sur les Îles de l'archipel. Dans toutes les îles, les modèles d'écoulement indiquent que : i) les réservoirs sont limités par les horsts composés de formations géologiques peu perméables; ii) les aquifères sont en contact avec l'océan et certains sont ouverts sur les lagunes, par l'intermédiaire de milieux humides où la nappe affleure; iii) les courbes piézométriques en bordure du horst sont globalement parallèles et montrent des gradients hydrauliques élevés (de l'ordre de 0,01), en aval de cette zone, les gradients sont généralement plus faibles (de l'ordre de 0,001); iv) les gradients hydrauliques sont faibles dans la partie sud et est de l'île du Cap-aux-Meules (Lavernière et la partie sud de l'Étang-du-Nord) traduisant un milieu très perméable; v) des réservoirs hétérogènes sur les Îles de la Grande-Entrée et de Grosse-Île, liés à la présence d'une épaisseur de 60 m de sables glaciaires quaternaires peu perméables à la Grande-Entrée.

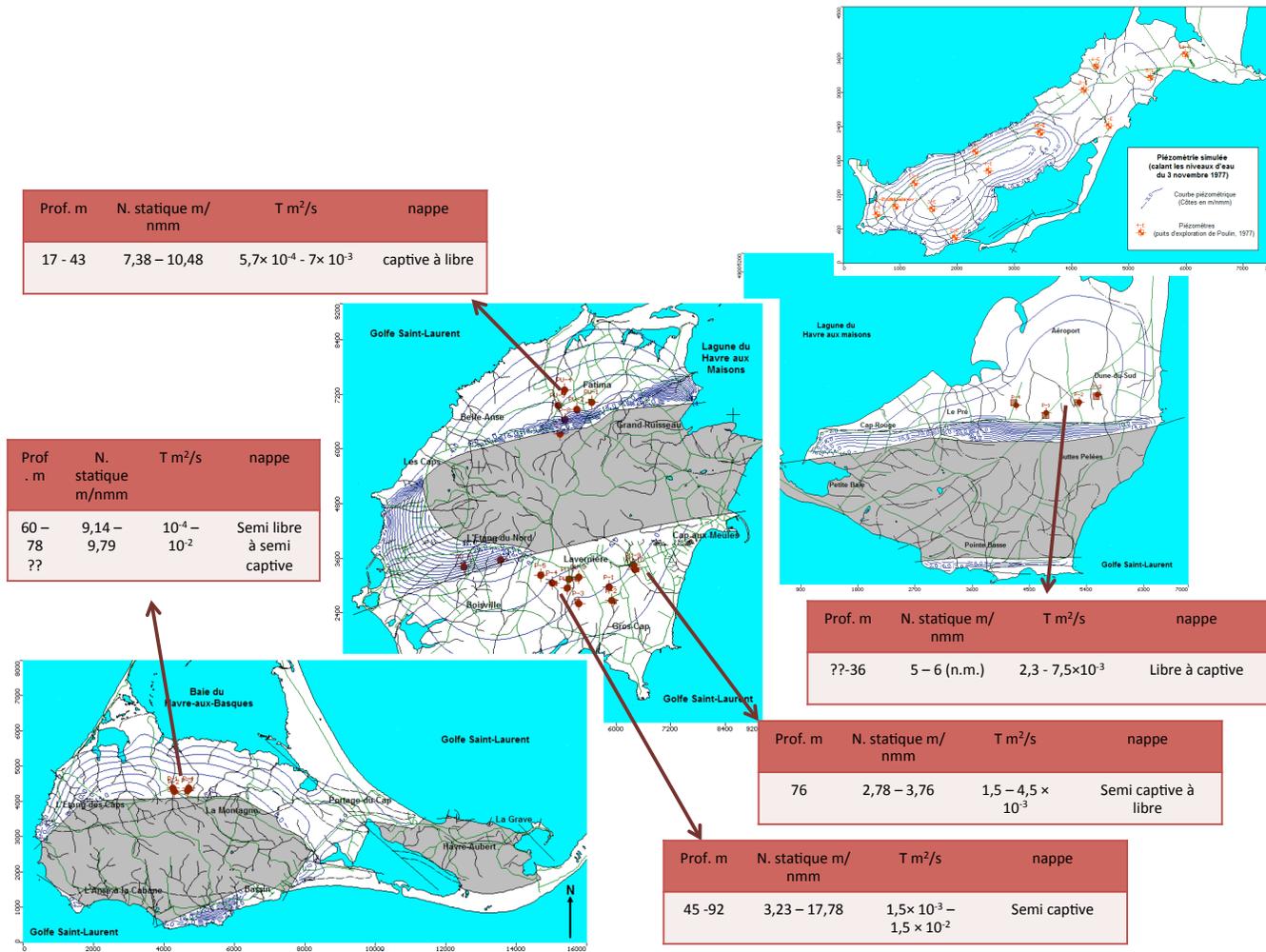


Figure 3. 11. Niveaux piézométriques calculés pour les (a) îles du Havre-Aubert, (b) du Cap-aux-Meules, (c) du Havre-aux-Maisons et (d) de la Grande-Entrée à partir d'un régime permanent. Les paramètres moyens mesurés lors des essais de pompages effectués par le Groupe Madelin'Eau (2004) en mai 2003 sont rapportés : profondeur en mètre (Prof.), niveau statique en mètre par rapport au niveau marin moyen (N. statique), transmissivité en m<sup>2</sup>/s (T) et l'état de la nappe évalué à partir des coefficients d'emmagasinement.

### **3.4.3 Vitesse de la recharge et temps de séjour de l'eau**

La connaissance des temps de séjour et de renouvellement de l'eau est essentielle pour gérer efficacement des accidents de **pollution**. Aux Îles, les aquifères sont tous alimentés par l'infiltration diffuse de l'eau de pluie, les réservoirs superficiels ne les alimentant que partiellement. La porosité de ces systèmes semble permettre à l'eau de circuler rapidement et d'être rapidement renouvelée en deçà de quelques mois, voire une année. À l'aide de traceurs passifs et conservatifs (l'ion Cl<sup>-</sup> contenu dans les sels de déglacage), Comte (2008) a estimé la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère des grès rouges à des valeurs variant entre 150 et 300 m par année, ces vitesses étant représentatives des conditions naturelles (à l'extérieur des zones sous l'influence de pompages). Ces vitesses, en comparaison avec la géométrie des réservoirs, concordent avec les hypothèses de Madelin'Eau.

La datation postnucléaire des eaux souterraines par une approche multitraçage constitue une démarche complémentaire à ce qui a déjà été fait pour les Îles. Le tritium, le carbone 14 du carbone inorganique dissous ou encore les chlorofluorocarbones (CFC) permettent de déterminer l'âge apparent moyen des eaux, les proportions des mélanges d'eau issus des recharges intervenues à différentes périodes et leurs âges respectifs ainsi que le taux de renouvellement de la nappe. Ces connaissances supplémentaires seraient particulièrement pertinentes dans le contexte des changements climatiques observés et prédits, mais aussi très complémentaires aux modèles d'écoulement.

### **3.4.4 Disponibilité en eau**

L'alimentation en eau potable de l'archipel est réalisée actuellement à partir de 35 puits municipaux entre les îles de Havre-Aubert, de Cap-aux-Meules, d'Havre-aux-Maisons et de la Grande-Entrée (Figure 3. 1).

D'après les exercices de modélisation réalisés par Madelin'Eau en 2003 (Madelin'Eau, 2004), les captages municipaux et leurs réservoirs de distribution permettent de soutenir l'alimentation en eau potable des secteurs desservis, y compris durant les périodes de forte demande, comme pendant la période estivale (tourisme).

En termes de bilan hydrogéologique, le calcul du bilan des entrées – sorties d'eau dans les trois réservoirs aquifères les plus sollicités montre que l'exploitation actuelle est loin d'épuiser la ressource (Tableau 3. 3). Les débits d'exploitation semblent globalement respecter les débits recommandés. En effet, seulement 7 à 20 % de toute l'eau qui s'infiltré dans les grès rouges est interceptée et pompée par les puits municipaux. Ces calculs sont basés sur le modèle d'écoulement développé et appliqué par Madelin'Eau (2004, 2007 et 2009).

Madelin'Eau (2004) souligne que l'évaluation des disponibilités des ressources en eau souterraine pour les besoins futurs doit cependant se faire en tenant compte de l'effet de la répartition spatiale des prélèvements et de l'équilibre du biseau salé. En effet, la répartition actuelle des puits municipaux peut être responsable d'une exploitation intense et localisée de la ressource. Par exemple, dans certains secteurs de l'île du Cap-aux-Meules, plus de 40 % de la recharge est déjà interceptée. En termes de quantité d'eau, ce chiffre pourrait laisser supposer qu'il reste encore environ 60 % de ressource renouvelable exploitable. Ceci n'est pas le cas puisque ces 60 % de la recharge non interceptée servent à maintenir la position actuelle du biseau salé en « refoulant » vers la mer et vers le fond les eaux salines (*cf.* Section 2.5). Il en va de même pour les secteurs vierges où l'on ne peut envisager de capter toute la ressource disponible ou encore pour les secteurs proches de la mer qui sont particulièrement vulnérables aux intrusions salines et où tout prélèvement important est exclu.

Finalement, Madelin'Eau (2004) conclut que la formation aquifère des grès rouges devrait suffire aux besoins en eau actuels et futurs des habitants des Îles-de-la-Madeleine. Il convient de mentionner que dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques, le MDDEFP réalise des travaux de géophysique qui, à ce jour, ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur la position de la zone de mélange eau douce-eau salée (Chouteau, 2011). De plus, le MDDEFP a confié à des spécialistes de modélisation hydrogéologique du département de géologie et de génie de l'Université Laval, le mandat de procéder à la modélisation numérique du comportement des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine. Ces travaux de modélisation permettront de préciser l'approche à privilégier pour suivre l'effet des changements climatiques sur la ressource eau souterraine, et de mettre à jour les règles d'exploitation durable des eaux souterraines

Tableau 3. 3. Bilan hydrogéologique pour les aquifères les plus sollicités (inspiré de Madelin'Eau, 2004, 2007 et 2009).

| Secteurs                 | Entrée<br>Infiltration m <sup>3</sup> /j | Prélèvements par pompage puits<br>municipaux m <sup>3</sup> /j | Sortie vers la mer m <sup>3</sup> /j |
|--------------------------|--|--|--------------------------------------|
| <b>Cap-aux-Meules</b>    |  |  |                                      |
| Étang du Nord            | 26 560 (100 %)                           | 3 562 (13 %)   | 22 998 (87 %)                        |
| Fatima                   |  |  |                                      |
| <b>Havre-Aubert</b>      | 21 778 (100 %)                           | 1 582 (7 %)  | 20 195 (93 %)                        |
| <b>Havre-aux-Maisons</b> | 6 364 (100 %)                            | 782 (12 %)   | 5 583 (88 %)                         |
| <b>Grande-Entrée</b>     | 4 147 (100 %)                            | 215 (5 %)  | 3 932 (95 %)                         |
| Flanc Nord               |  |  |                                      |
| <b>Grande-Entrée</b>     | 665 (100 %)                              | 130 (20 %)   | 535 (80 %)                           |
| Sud-est                  |  |  |                                      |

### 3.4.5 Décharges d'eau souterraine aux écosystèmes aquatiques de surface

Les données de décharges sont calculées à partir des sorties du modèle. Cette valeur semble s'ajuster pour obtenir un bilan hydrique équilibré. D'après ces valeurs de l'ordre de 80 à 90 % (Tableau 3. 3), les décharges d'eau souterraine sont particulièrement importantes et contribueraient à un apport d'eau douce, mais aussi de composés chimiques (matière organique dissoute, nutriments, contaminants organiques et inorganiques potentiels). Comme présentées au Chapitre 1, ces décharges souterraines à travers les sédiments perméables sont communes en domaine littoral et contribuent à la « santé » des écosystèmes côtiers. Aux Îles-de-la-Madeleine, il n'y a, à notre connaissance, aucune mesure directe de ces décharges.

## 3.5 LES RISQUES DE CONTAMINATION PAR L'EAU SALÉE

Le réservoir aquifère des grès rouges étant perméable, un lien hydraulique direct existe entre celui-ci et les eaux salées du golfe du Saint-Laurent qui entourent les Îles-de-la-Madeleine. L'eau douce qui se trouve dans le réservoir aquifère et qui provient de l'infiltration de la pluie et de la neige fondue « flotte » littéralement sur l'eau salée. Cette dernière étant plus dense, elle reste au fond. Cet équilibre est précaire et une déstabilisation du système soit par des forçages internes (pression anthropique associée au pompage par exemple) ou par des forçages externes (pression naturelle associée à la hausse du niveau marin, par exemple) doit être surveillée.

### 3.5.1 Historique d'intrusion saline dans l'archipel

Les problèmes d'intrusions salines ne sont pas nouveaux aux Îles. Les sondages de 1971 effectués par Gilliland (1971) montrent un déplacement de l'interface eau douce/eau salée dans le secteur

capté de Cap-aux-Meules. Il apparaît aussi que le socle rocheux sous l'île de la Pointe-aux-Loups est trop profond pour former un plancher imperméable sous la nappe et que les eaux douces « flottent » sur de l'eau salée au centre de l'île. Les travaux d'Omnès (1976) mettent aussi en évidence une avancée de l'eau salée dans trois secteurs de pompage.

Plus récemment, et suite au développement d'une activité industrielle particulière, les nappes d'eau du secteur de l'île de la Grande-Entrée ont subi des remontées d'eau salée (Comte, 2008; Madelin'Eau, 2009). L'entreprise Madelimer Inc., une usine de transformation de poissons, exploitait une station de pompage pour sa consommation d'eau douce d'environ 200 m<sup>3</sup>/jour. Ces forts débits journaliers ont entraîné une remontée d'eau salée à l'aplomb de leur puits. Cette activité a cessé récemment.

### **3.5.2 Exploitation de l'eau**

Lorsqu'une trop grande quantité d'eau douce est pompée, le gradient hydraulique peut s'inverser et de l'eau salée provenant de la mer s'introduit dans le réservoir aquifère des grès (pour en compenser la perte), risquant d'entraîner un mélange de l'eau douce avec l'eau de mer et une remontée du niveau de l'eau salée dans l'aquifère. L'alimentation en eau potable des Madelinots dépend donc d'un aquifère en équilibre avec l'eau de mer : un pompage excessif ou mal réparti sur le plan spatial peut engendrer un déséquilibre et une invasion par de l'eau salée.

Afin d'évaluer l'effet d'une augmentation des pompages, Madelin'Eau (2004) a simulé la position de l'interface eau douce/eau salée (utilisation du modèle SUTRA) pour différents scénarios et dans les différents secteurs des Îles-de-la-Madeleine. À titre d'exemple, la Figure 3.12 illustre la représentation 3D des résultats obtenus pour les différents scénarios de prélèvement simulés pour les secteurs Étang-du-Nord et Cap-aux-Meules. D'autres scénarios, également testés par Madelin'eau en 2009 pour le secteur Grande-Entrée, sont présentés par une vue en coupe à la Figure 3.13. On voit clairement sur ces deux figures les conséquences des intensités de pompage sur l'étendue et la profondeur des eaux douces dans l'aquifère. Les résultats de ces scénarios amènent Madelin'Eau (2004) à faire les constats suivants :

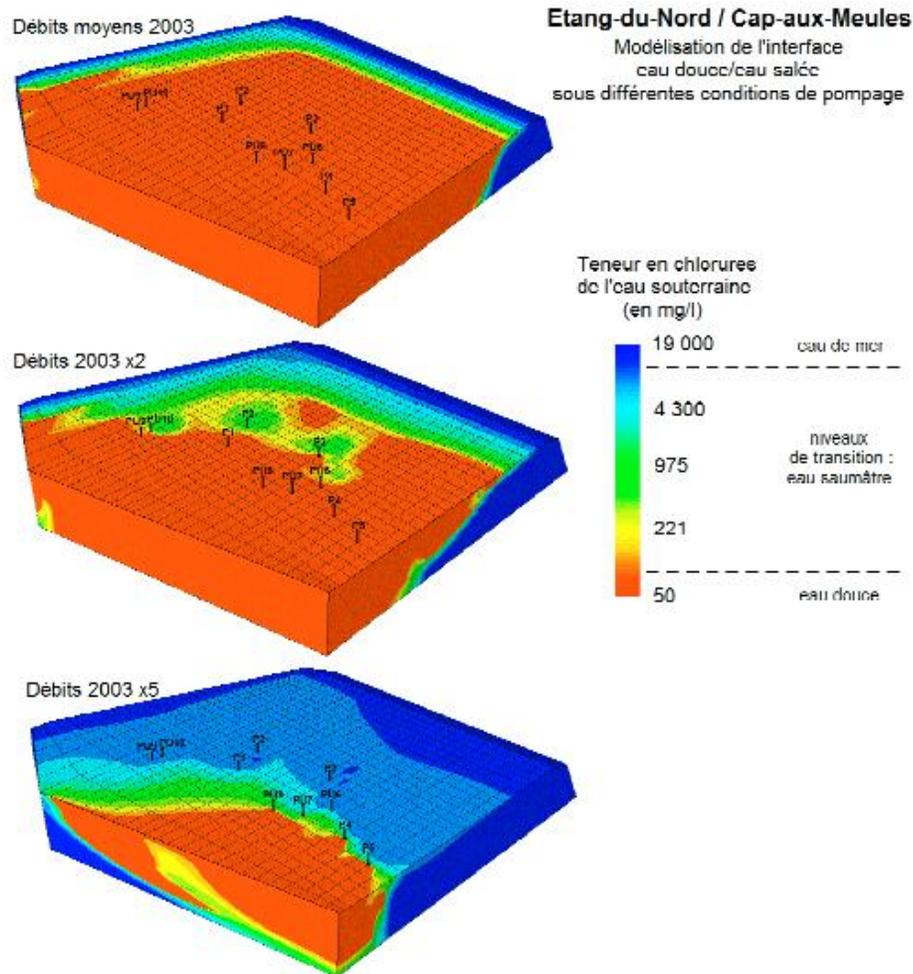


Figure 3. 12. Séquence d'augmentation du débit de pompage et impact sur le déplacement du biseau salé dans l'aquifère de grès rouge. Exemple du secteur de l'Étang-du-Nord sur l'île de Cap-aux-Meules. Cette simulation a été obtenue par le Groupe Madelin'Eau (2004) avec le modèle SUTRA en régime permanent, avec les mêmes paramètres d'entrée que pour les exercices de MODFLOW.

- De manière générale, le régime de pompage des puits (correspondant à celui de 2003) n'induit pas d'**intrusion saline**, et ce, dans aucun des secteurs des Îles-de-la-Madeleine.
- Le doublement de ces débits annuels moyens de pompage (année 2003) provoquerait des remontées salines au droit de certains puits. Ce scénario correspond au régime de pompage lors de la période estivale maintenue tout au long d'une année. Le régime de pompage de la période estivale est le plus élevé annuellement en raison de l'augmentation de la population des Îles (saison touristique).

- Le quintuplement des débits moyens (année 2003) provoquerait une invasion marine totale jusqu'aux puits les plus éloignés de la mer, contaminant ainsi la totalité des puits. Ce scénario correspond à des pompages qui dépasseraient le taux de recharge de l'aquifère (volume prélevé supérieur à la quantité de pluie et de neige fondue qui s'infilte).
- La répartition spatiale des puits et des débits de pompage joue un rôle prédominant dans la dynamique de la mise en place des remontées ou des intrusions salines. Madelin'Eau précise que « *Pour prévenir les possibilités d'intrusions salines, le développement de la ressource en eau ne peut passer que par l'implantation de nouveaux puits judicieusement répartis et dans des secteurs actuellement inexploités ainsi que par une réorganisation des modalités d'exploitation des puits existants* ».

Suite à ces recommandations, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a élaboré un plan d'exploitation qui comprend, entre autres, un programme de suivis des débits, des niveaux d'eau (piézométrie) et de la qualité (chlorures, sodium, conductivité électrique). Ce plan d'exploitation s'appuie sur le modèle des écoulements souterrains développés par Madelin'Eau. Le plan répondrait aux besoins de développement pour les 30 prochaines années et il vise à assurer une gestion durable des ressources en eau souterraine (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2012).

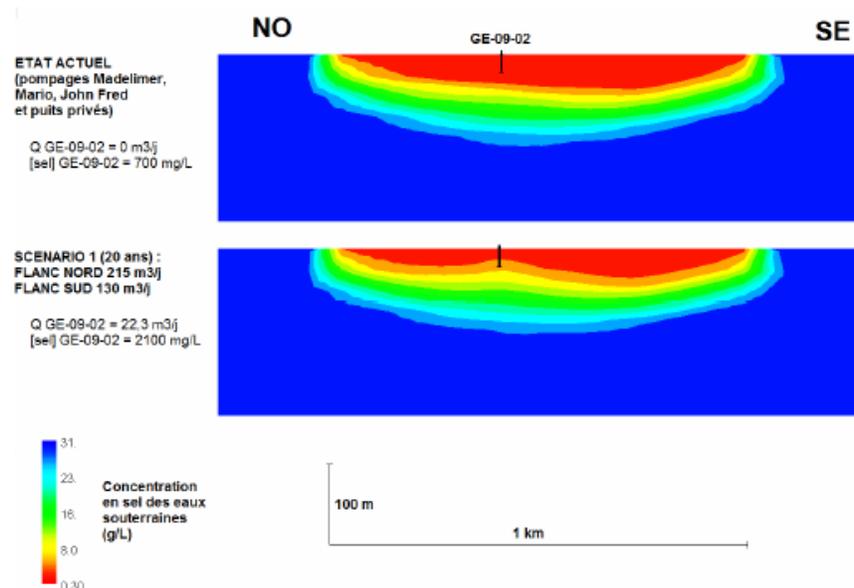


Figure 3. 13. Comparaison de la salinité de la nappe dans la situation actuelle et selon le scénario d'un pompage de 20 ans (tirée de Madelin'eau, 2009).

### 3.5.3 Les pressions naturelles liées aux changements environnementaux globaux posent-elles un risque?

Il est indiscutable aujourd'hui que les systèmes côtiers connaissent des changements importants. Les Îles-de-la-Madeleine n'en sont pas exemptes et sont même, de par leur situation géographique et leur insularité, au premier plan. Dans le Chapitre 1, nous avons discuté de l'impact potentiel d'une hausse de niveau marin (associée à une **subsidence** tectonique), de l'érosion et de l'inondation des berges sur la **salinisation** des aquifères côtières. Nous nous sommes aussi intéressés à l'impact d'une augmentation des températures globales et d'un changement dans les régimes de précipitation sur les taux de recharge des nappes d'eau. Dans le Chapitre 2, en dressant un portrait géographique des Îles, nous avons constaté que ces changements sont déjà en cours aux Îles-de-la-Madeleine. Ils sont visibles. Il n'existe actuellement qu'une seule étude menée sur l'archipel qui porte sur la vulnérabilité et les risques encourus par les aquifères face à ces changements climatiques (Chouteau *et al.*, 2011). Cette étude, mandatée par le MDDEFP, a pour objectifs de développer une méthode géophysique suffisamment sensible pour détecter des variations dans les profondeurs de pénétration de l'eau salée sous l'aquifère, et de mettre en place un réseau de suivi (stations de surveillance) avec des mesures et des fréquences de levées adéquates au problème.

Les études de Chouteau *et al.* (2011) et de Comte (2008) ont identifié les secteurs les plus vulnérables aux intrusions salines. Ceux-ci correspondent aux endroits où la nappe est actuellement à une élévation relativement faible sous la zone des puits en exploitation. Ces secteurs sont ceux de l'Étang-du Nord (est) et de Fatima (Figure 3. 14 (A)) et de Grande-Entrée (Figure 3. 14 (B)). Ces trois zones suscitent une attention particulière et seront probablement les lieux d'implantation de stations de surveillance. Chouteau *et al.* (2011) soulignent également certaines incertitudes concernant la position de l'interface eau douce/eau salée pour les secteurs de Fatima (centre) et du Havre-aux-Maisons. Le MDDEFP réalisera des travaux complémentaires à l'automne 2012, notamment des levées géophysiques, des forages et le prélèvement d'échantillons de roc, qui permettront de lever les incertitudes mentionnées par Chouteau *et al.* (2011).

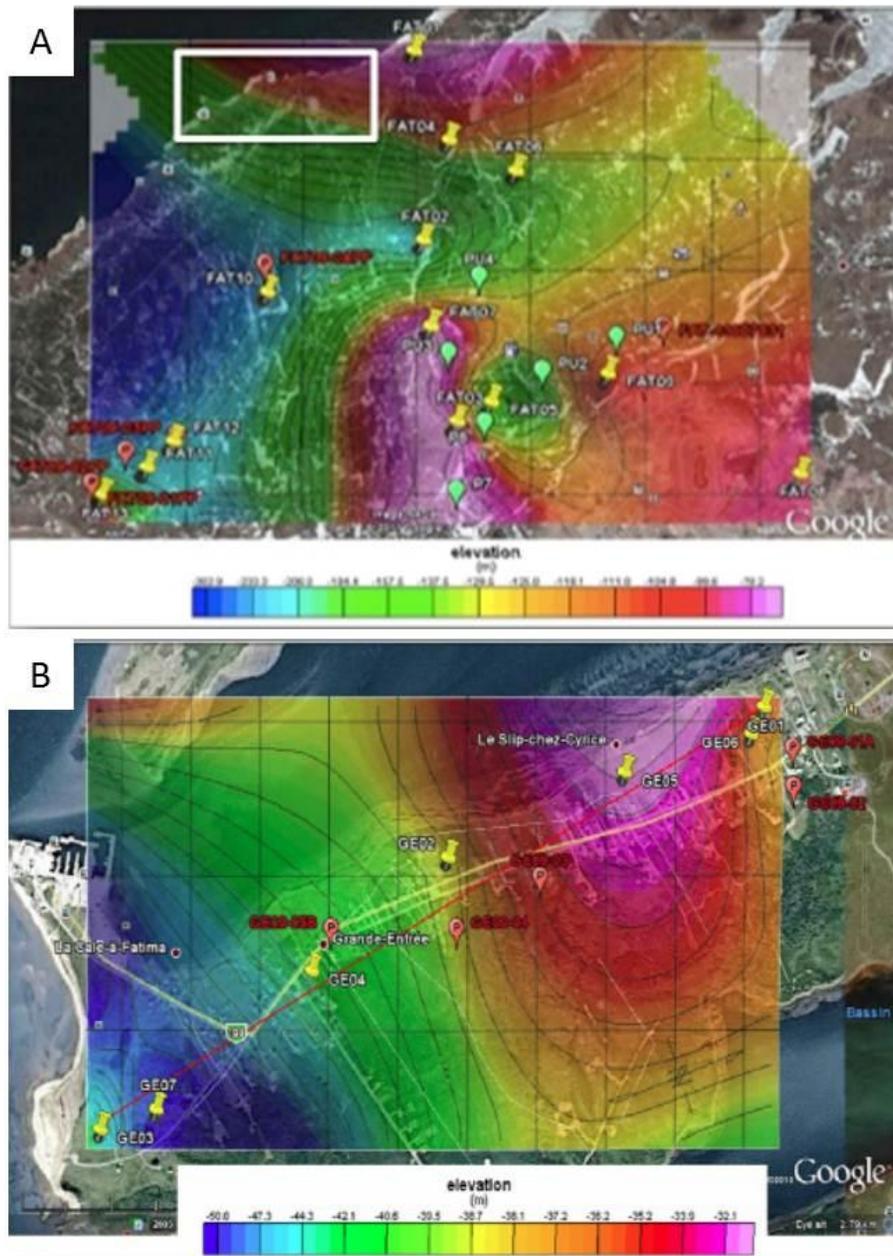


Figure 3. 14. Cartes des élévations de l'interface eau douce/eau salée obtenues par Chouteau et al. (2011) dans les secteurs de Fatima(A) et Grande-Entrée (B). Le rectangle blanc encadre la zone d'étude de Pierre & Bernatchez (2009). Rappelons que, dans le passé, la contamination du puits Madelimer qui alimentait l'usine du même nom témoigne de la grande sensibilité du secteur de Grande-Entrée à la contamination par l'eau de mer.

La profondeur de ces intrusions salines reste peu inquiétante à court terme vu le volume d'eau disponible et la rapidité de la recharge. Cependant, l'effet cumulatif des différents forçages pourrait avoir de l'importance si nous considérons la rapidité des changements environnementaux globaux. Par exemple, pour la zone de Fatima que Chouteau *et al.* (2011) présentent déjà comme plus vulnérable que d'autres zones, le taux de recul maximal des falaises estimé par Pierre &

Bernatchez (2009) est de 0,88 m/an (Figure 3. 15). Si ce taux reste constant, le haut de la falaise sera décalé d'une quarantaine de mètres vers l'intérieur des terres au cours des prochains 45 ans. Cette valeur est en accord avec le recul moyen de 34 m et de 56 m d'ici 2050 prévu pour le secteur est de Cap-aux-Meules et le secteur ouest de la Pointe-aux-Loups respectivement (Bernatchez *et al.*, 2008).

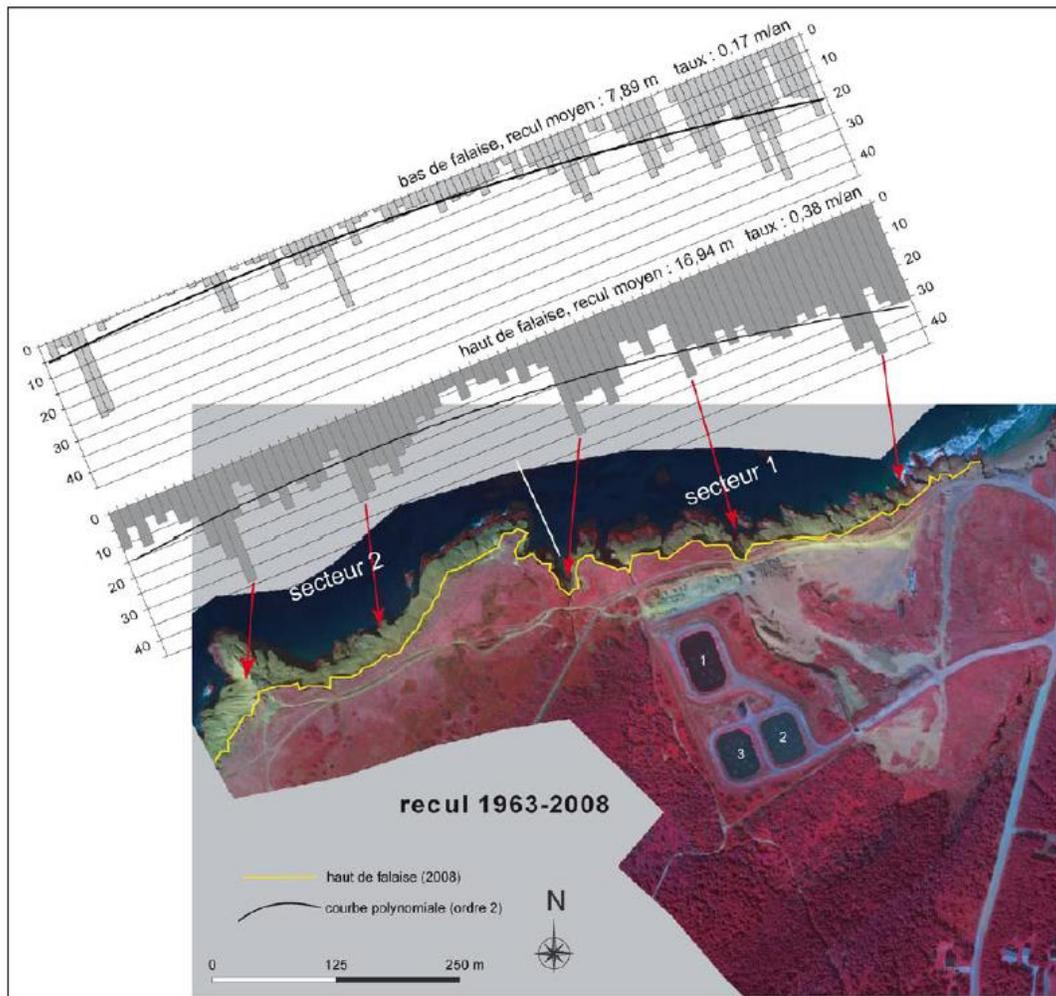


Figure 3. 15. Valeur et répartition du haut et bas de falaise dans le secteur de Fatima entre 1963 et 2008 (tirée de Pierre & Bernatchez, 2009).

### **3.6 LES RISQUES DE CONTAMINATION À PARTIR DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES DE SURFACE**

Les sections qui suivent font état des travaux réalisés par Madelin'Eau (2004) en lien avec l'évaluation des risques de contamination et la protection des puits d'eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeline. Ces travaux ont consisté à :

- effectuer l'inventaire des activités à risques et potentiellement polluantes présentes sur le territoire des Îles (cf. Chapitre 2, Section 2.3.2);
- délimiter les aires d'alimentation et les périmètres de protection de chacun des puits de la municipalité (Section 3.5.2);
- évaluer la vulnérabilité (ou degré de protection naturelle) des zones aquifères captées par les puits municipaux (Section 3.5.3).

La connaissance et l'intégration de ces trois niveaux d'information permettent d'évaluer les risques réels de contamination et, le cas échéant, d'adopter les mesures de protection qui s'imposent. À cet effet, Madelin'Eau mentionnait en 2004 : *« Les ressources ne sont pas uniquement vulnérables aux intrusions salines liées à un pompage excessif, mais également suite à une utilisation non adéquate du territoire entourant les ouvrages de captage. La présence de nombreuses sources de contamination potentielle dans les environs immédiats de tous les puits municipaux renforce le besoin de la mise en place de mesures de suivi et de contrôle très efficaces ».*

#### **3.6.1 Historique de contamination des nappes dans l'archipel**

Les Madelinots se souviendront que les eaux souterraines ont été contaminées aux hydrocarbures provenant de l'ancienne centrale thermique d'Hydro-Québec qui était située dans le village de Cap-aux-Meules. À ce site, l'effet combiné d'un matériel poreux perméable et de fractures dans le sol rend vulnérable l'aquifère aux événements de contamination en surface. Il a été constaté en 1988 une migration verticale des hydrocarbures jusqu'à la nappe phréatique et une accumulation subséquente de 40 000 litres d'huile flottant sur la réserve d'eau. Bien que la contamination ait constitué une menace pour les puits municipaux de Cap-aux-Meules, les travaux de décontamination ont été entrepris au début des années 1990. Ces travaux ont permis de réduire et de contrôler les risques de contamination afférents à cette nappe d'huile souterraine.

Sur l'île d'Entrée, une situation semblable s'est produite à la centrale thermique d'Hydro-Québec fonctionnant au diésel. Jusqu'en 1993, des événements sporadiques ont conduit à la contamination des sols par des huiles lubrifiantes et d'autres hydrocarbures. Ces derniers ont pénétré jusqu'à la nappe phréatique. En mars 2002, le gouvernement du Québec a autorisé la restauration *in situ* de la nappe d'eau souterraine et des sols contaminés.

### **3.6.2 La délimitation des aires d'alimentation et des périmètres de protection**

L'inventaire des sources potentielles de contamination a été résumé dans le Chapitre 2 (Section 2.3.2). Toutes ont été cartographiées par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et elles sont répertoriées dans un système d'information géographique (SIG). Ces cartes sont utilisées pour délimiter les périmètres de protection autour des puits de captage municipaux (Figure 3. 16).

Les aires d'alimentation et les périmètres de protection immédiate, bactériologique et virologique, de chacun des puits de la municipalité ont été déterminés pour les Îles de façon conforme aux exigences du Règlement sur le captage des eaux souterraines. L'aire d'alimentation d'un puits de pompage correspond à la surface de terrain sur laquelle toute l'eau qui s'infiltré aboutit tôt ou tard au puits concerné (Figure 3. 16 et Figure 3. 18).

Les périmètres de protection bactériologique et virologique correspondent à des portions de l'aire d'alimentation définies par des temps de parcours de 200 jours et de 550 jours (temps nécessaire à l'eau qui s'infiltré pour atteindre le puits au débit moyen journalier). Les limites de 200 jours et de 550 jours coïncident avec les temps de survie maximum dans le sol des bactéries et virus, respectivement. Le périmètre de protection immédiate correspond à un rayon arbitraire de 30 mètres autour du puits concerné et il est généralement délimité physiquement sur le terrain par une clôture (Figure 3. 17).

Les aires d'alimentation et les périmètres de protection de chacun des puits municipaux des Îles-de-la-Madeleine sont donc connus. Les surfaces concernées par ces aires et périmètres sont intégrées au SIG de la municipalité ce qui permet le couplage avec différentes couches d'information, dont celle concernant les sources potentielles de contamination. À titre d'exemple, la Figure 3. 16 illustre la superposition des périmètres de protection virologique et bactériologique sur un fond de carte présentant les sources potentielles de contamination pour les puits PU-5 et PU-6 situés sur l'île du Cap-aux-Meules.

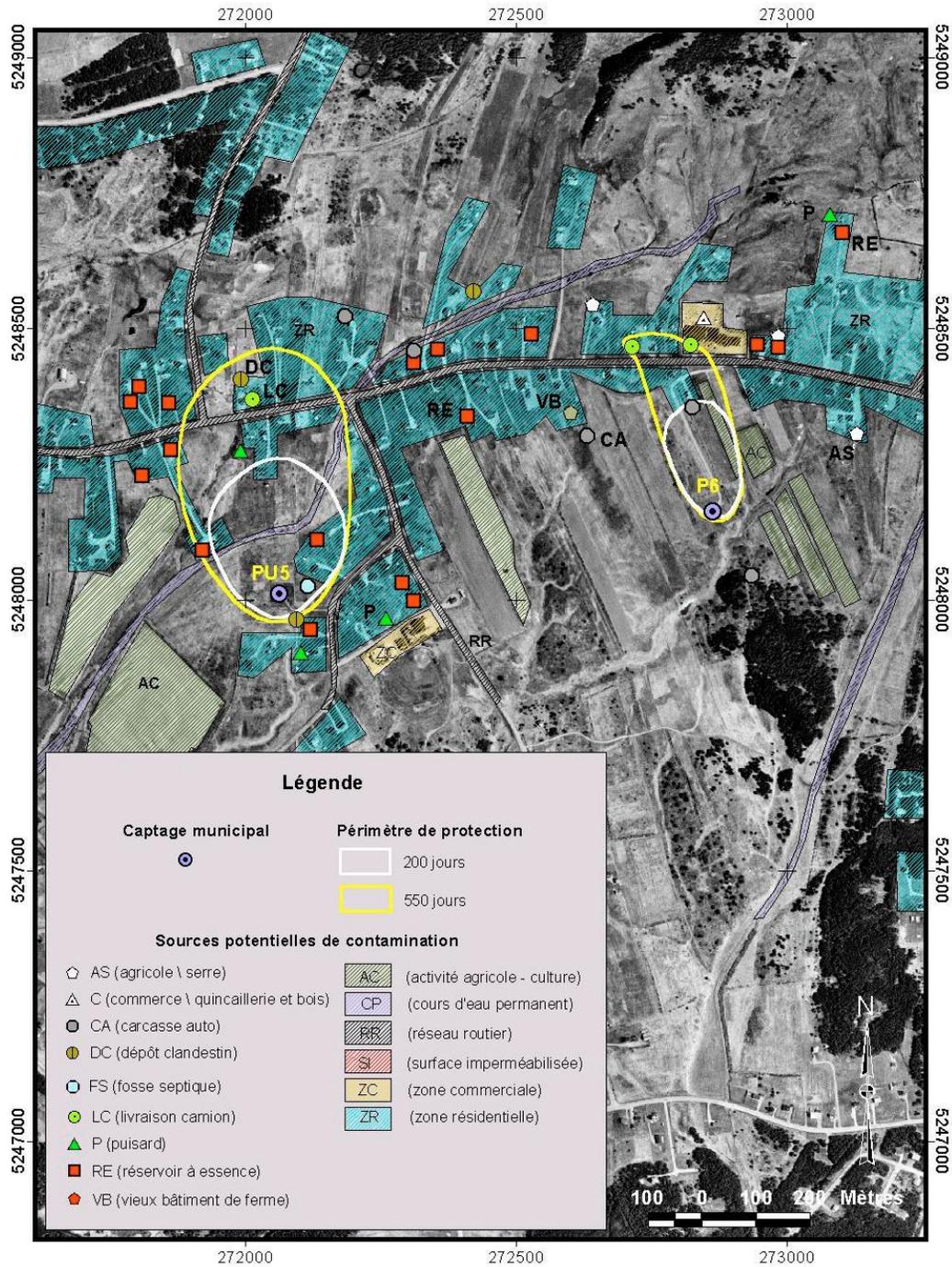


Figure 3. 16. Sources potentielles de contamination et périmètres de protection des puits PU-5 et PU-6 sur l'île du Cap-aux-Meules (tirée de Madelin'Eau, 2004).

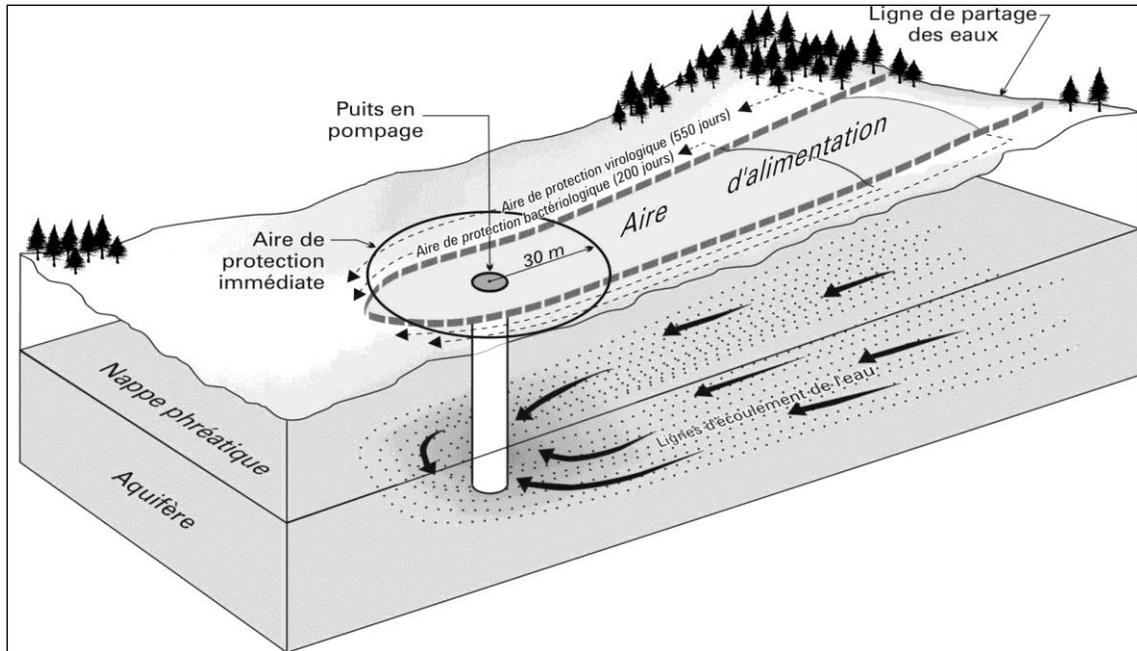


Figure 3. 17. Aire d'alimentation et aires de protection (tirée de Rodriguez, 2011).

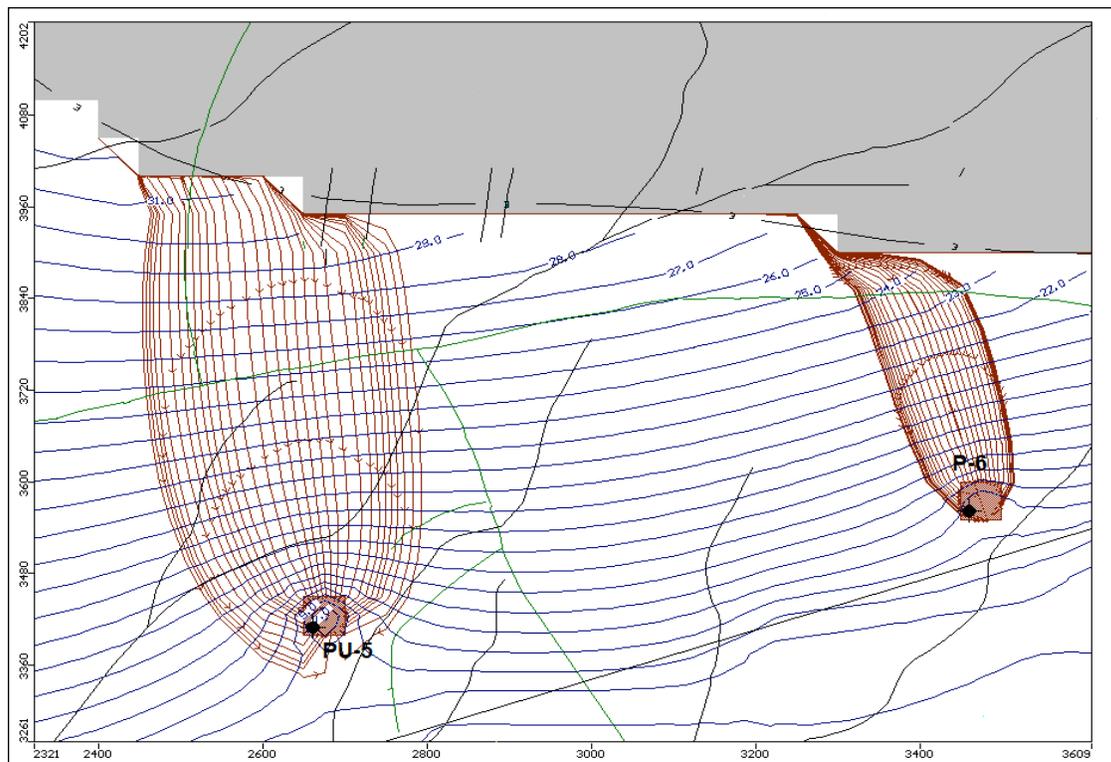


Figure 3. 18. Aire d'alimentation des puits PU-5 et PU-6/île du Cap-aux-Meules (tirée de Madelin'Eau 2004).

### 3.6.3 Évaluation de la vulnérabilité à la contamination

La vulnérabilité des zones aquifères captées par les puits de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (aires d'alimentation des puits) a aussi été déterminée par Madelin'Eau (2004). En évaluant la vulnérabilité du système aquifère, celui des grès rouges, on peut estimer le degré de protection naturelle du système contre l'infiltration et la migration des **contaminants conservatifs**. La vulnérabilité mesurée est reliée aux propriétés du système sans égards aux activités polluantes qui seraient présentes et aux processus géochimiques impliqués dans la transformation des composés; il s'agit de vulnérabilité intrinsèque. L'estimation de la vulnérabilité intrinsèque combinée à l'inventaire des activités potentiellement polluantes permet de quantifier les risques de contamination. Tel que prescrit par le Règlement sur le captage des eaux souterraines (MDDEP, 2012 (a)), la vulnérabilité de la formation aquifère des grès rouges des Îles-de-la-Madeleine a été évaluée selon la méthode DRASTIC. Les sept lettres de l'acronyme DRASTIC représentent les paramètres permettant de calculer l'indice de vulnérabilité en intégrant sept indicateurs:

- D : Depth to water table = profondeur de la nappe d'eau
- R : Recharge = infiltration efficace
- A : Aquifer media = milieu aquifère
- S : Soil media = type de sol (pédologie)
- T : Topography = pente du terrain
- I : Impact of the vadose zone = impact de la zone non saturée
- C : Hydraulic Conductivity = conductivité hydraulique

L'indice de vulnérabilité DRASTIC correspond à un nombre dont la valeur croît avec le niveau de vulnérabilité de la formation aquifère. Le calcul de l'indice résulte en des valeurs minimale et maximale de 23 et 226. Un indice de 100 ou plus indique que les propriétés du système aquifère ne garantissent pas une bonne protection contre l'infiltration et la migration de contaminants provenant de la surface du sol. Les évaluations effectuées par Madelin'Eau (2004, 2007 et 2009) situent les indices de vulnérabilité DRASTIC pour les aires d'alimentation des différents puits de la formation aquifère des grès rouges entre 101 et 144. Cette plage de valeurs indique que la formation aquifère des grès rouges présente une vulnérabilité moyenne aux activités à risque et potentiellement polluantes ayant lieu à la surface du sol. Le Tableau 3. 4 présente une synthèse des valeurs DRASTIC calculées dans différents puits municipaux et privés. La Figure 3. 19 cartographie les indices DRASTIC pour l'ensemble des Îles-de-la-Madeleine. Les classes utilisées pour la cartographie sont arbitraires, mais elles visent à faire ressortir les secteurs où

l'indice est plus grand que 100. On observe une forte autocorrélation spatiale des indices, c'est-à-dire que les valeurs élevées sont concentrées les unes près des autres.

Tableau 3. 4. Tableau de synthèse des données sur différents puits municipaux. Les données recensées sont les valeurs DRASTIC, le pH, la concentration en nitrate et nitrite, la concentration en chlorure, les concentrations en potentiel de trichlorométhanes totaux et le chloroforme. Les données sont tirées des différentes études de Madelin'Eau. Recommandation Santé Canada (cf. Chapitre 1) : pH de 6,5 à 8,5; NO3/NO2 : 10 mg N/L; Cl- : 250 mg Cl/L.

| Sites                    | No de puits | Risque d'intrusion saline | DRASTIC        | pH         | Nitrate/nitrite<br>mg/L | Chlorure<br>mg/L | Chloroforme<br>ug/L | SDS-THM<br>ug/L | Date      | Rapport<br>Madelin'eau |
|--------------------------|-------------|---------------------------|----------------|------------|-------------------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------|------------------------|
| Havre-aux-maisons        | P1          | Oui                       | 122            | Non-mesuré | Non-mesuré              | Non-mesuré       | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Mai 2003  | Déc. 2004 doc.3        |
| Havre-aux-maisons        | P2          | Oui                       | 127            | Non-mesuré | Non-mesuré              | Non-mesuré       | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Mai 2003  | Déc. 2004 doc.3        |
| Havre-aux-maisons        | P3          | Oui                       | 136            | Non-mesuré | Non-mesuré              | Non-mesuré       | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Mai 2003  | Déc. 2004 doc.3        |
| Havre-aux-maisons        | P4          | Oui                       | 131            | Non-mesuré | Non-mesuré              | Non-mesuré       | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Mai 2003  | Déc. 2004 doc.3        |
| Havre-aux-maisons        | HAM-09-01PP | Oui                       | 11             | 7.5        | 2.4                     | 33               | 2.0                 | 6.0             | Déc. 2009 | Sept. 2011             |
| Havre-aux-maisons        | HAM-09-02PP | Oui                       | 104            | 7.9        | 1.0                     | 28               | Non-disponible      | 12.0            | Déc. 2009 | Sept. 2011             |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-01     | Oui                       | Non-disponible | 6.6        | 0.33                    | 29               | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Nov. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-02     | Oui                       | Non-disponible | 6.7        | 0.29                    | 34               | Non-mesuré          | Non-mesuré      | Nov. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-03     | Oui                       | 134            | 6.4        | 0.03                    | 27               | 0.51                | 13.9            | Déc. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-04     | Oui                       | 133            | 7.0        | 0.16                    | 48               | Non-mesuré          | 30.4            | Déc. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-05     | Oui                       | 144            | 6.8        | 0.05                    | 26               | Non-mesuré          | 20.8            | Déc. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc sud  | FE06-06     | Oui                       | 144            | 6.4        | 0.17                    | 31               | Non-mesuré          | 23.6            | Déc. 2006 | Mars 2007              |
| Grande-Entrée flanc nord | GE09-1A     | Oui                       | 124            | 7.8        | 6.6                     | 77               | 0.77                | 9.8             | Mai 2009  | Juillet 2009           |
| Grande-Entrée flanc nord | GE09-02     | Oui                       | 124            | 7.9        | 1.4                     | 45               | 0.48                | 9.2             | Mai 2009  | Juillet 2009           |
| Grande-Entrée flanc nord | GE09-03     | Oui                       | 146            | 7.3        | 0.48                    | 54               | 2.2                 | 9.0             | Mai 2009  | Juillet 2009           |
| Grande-Entrée flanc nord | GE09-04     | Oui                       | 136            | 7.6        | 1.6                     | 57               | 8.3                 | 13.6            | Mai 2009  | Juillet 2009           |
| Grande-Entrée flanc nord | GE09-05B    | Oui                       | 134            | 7.1        | 2.5                     | 72               | 0.36                | 20.1            | Mai 2009  | Juillet 2009           |
| Fatima                   | FAT-09-01PP | Oui                       | 101 à 113      | 6.4        | 3.2                     | 35               | Non-disponible      | 12.0            | Nov. 2009 | Sept. 2011             |
| Fatima                   | FAT-09-02PP | Oui                       | 101 à 113      | 7.3        | 1.5                     | 32               | Non-mesuré          | 12.0            | Nov. 2009 | Sept. 2011             |
| Fatima                   | FAT-09-03PP | Oui                       | 101 à 113      | 7.6        | 2.4                     | 89               | Non-mesuré          | 11.0            | Nov. 2009 | Sept. 2011             |
| Fatima                   | FAT-09-04PP | Oui                       | 101 à 113      | 6.9        | 0.49                    | 43               | 9.00                | 15.0            | Nov. 2009 | Sept. 2011             |

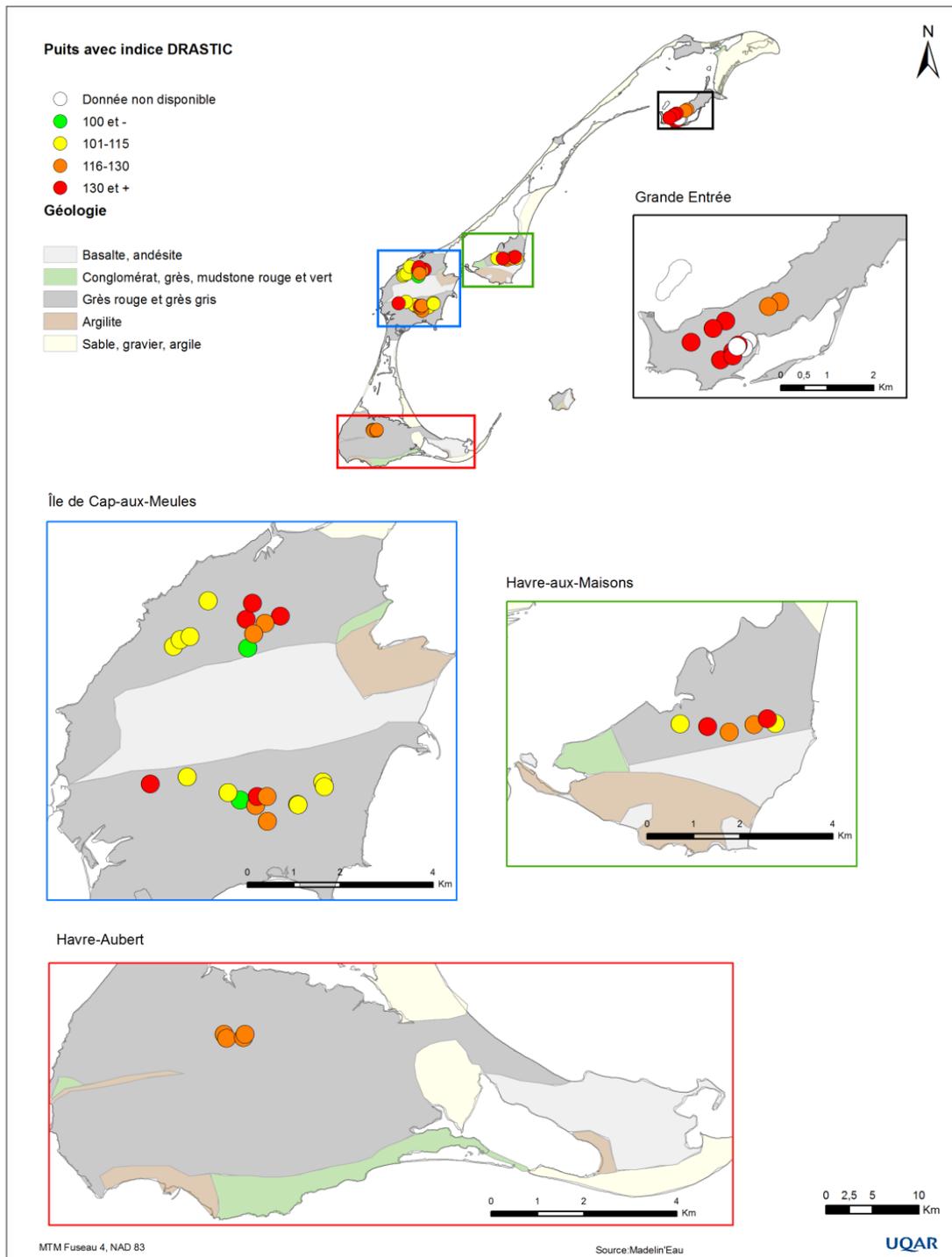


Figure 3. 19. Distribution des indices DRASTIC pour les puits municipaux sur l'ensemble des Îles de la Madeleine (données tirées de Madelin'Eau 2004; 2007; 2009).

### 3.7 LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES ET SON SUIVI

Les résidents des Îles-de-la-Madeleine jouissent d'une eau douce souterraine d'une excellente qualité qui répond aux exigences du Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) et ce sans traitement, ou avec un traitement minimal (Ellis, 2012). À l'état naturel, l'eau souterraine de l'archipel est de très bonne qualité.

La présence de nitrates et de nitrites dans certains puits municipaux et privés à des concentrations supérieures aux bruits de fond naturels ( $> 1 \text{ mg-N/l}$ ) et la présence de chlorures trouvés dans l'eau de puits privés situés aux abords de certains axes routiers, probablement associés à l'épandage de sels de déglacage, constituent des situations à surveiller. Les concentrations sont cependant, dans les deux cas, inférieures aux normes établies au Québec (Tableau 3. 4). Les données de pH sont plus proches des limites d'acidité prévues par les normes et sont à surveillées avec plus d'attention. Ces valeurs peuvent être expliquées par:

- des réactions d'oxydoréduction liées à la dégradation de la matière organique dissoute présente dans le système; ces réactions sont ubiquistes dans la nature et témoigneraient de la réactivité biogéochimique de la formation aquifère des grès rouges;
- des eaux d'infiltration plus acides, plus riches en azote (reliées aux installations septiques ou à l'épandage d'engrais azotés) et en chlorure (sels de déglacage) en fonction des sols et des activités de surface.

Dans la dernière décennie, les centaines d'analyses chimiques effectuées sur les aquifères des Îles-de-la-Madeleine n'ont jamais révélé de concentrations notables de pesticides ou de métaux lourds. Par contre, la présence des trihalométhanes, tels que le chloroforme, est à surveiller plus attentivement. Ces composés halogénés se forment naturellement dans les aquifères côtiers en présence de matière organique dissoute et de composés halogénés (Cl, Br, I, *cf.* Chapitre 1). Bien que le potentiel de formation des THM (SDS-THM, Tableau 3. 4) semble stable, la concentration en chloroforme aurait augmenté de 2006 à 2009, tout en demeurant sous les normes du ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs (*c.-à-d.*  $80 \mu\text{g/l}$ ). Cette situation n'est pas alarmante, mais pourrait être accentuée dans le cas de post-traitement de chloration des eaux de pompage. Par exemple, dans le Bas St-Laurent, plusieurs petits réseaux municipaux, qui appliquent la chloration, présentaient des concentrations de THM totaux dans l'eau potable au-delà de la norme; ceci est particulièrement vrai pour les eaux captées qui se trouvent sous l'influence des tourbières et des milieux humides (Laferrrière *et al.*, 1999). La présence du

chloroforme dans l'eau des Îles-de-la-Madeleine suscite aussi ce questionnement : cette augmentation est-elle associée à une augmentation de l'intrusion saline ou à une diffusion/advection des composés (THM), de leur zone de formation (zone de mélange) aux puits mesurés? De manière générale, il existe peu d'informations sur la position et l'étendue de la zone de mélange qui est souvent considérée comme statique par les différentes méthodes de mesure (calculées par le modèle SUTRA ou estimées indirectement par les méthodes géophysiques). Une migration rapide de quelques mètres de l'eau salée et saumâtre peut provoquer des changements ioniques et chimiques qui se font ressentir longtemps après le retrait de la masse d'eau. Notons que des contrôles hebdomadaires et mensuels sont effectués pour s'assurer que la qualité de l'eau distribuée dans les aqueducs est conforme aux normes du Règlement sur la qualité de l'eau potable. Les résultats d'analyses sont vérifiés par la municipalité ainsi que par le MDDEFP (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2012).

En ce qui concerne le suivi préventif de la qualité de l'eau, Madelin'Eau (2004) suggère de mesurer la qualité de l'eau souterraine à la sortie de chacun des puits de la municipalité, soit à l'eau brute (avant sa distribution dans les réseaux d'aqueduc) et ce, à fréquence régulière. « *Un suivi physico-chimique et bactériologique de l'eau brute avec seuils d'alerte (seuil d'intervention avant un dépassement de normes ou l'atteinte d'une situation critique) est recommandé. Ce suivi permettra de localiser plus facilement l'origine d'une pollution en cas de contamination et de mieux connaître l'évolution de la qualité de la ressource au fil des années. Ainsi, en cas de problèmes, des décisions pourraient être prises avant que la situation ne devienne irréversible* ». Tenant compte du caractère vulnérable de la formation aquifère des grès rouges (indice DRASTIC supérieur à 100), de la présence de nombreuses activités susceptibles d'émettre des contaminants qui se situent dans l'aire d'alimentation de plusieurs des puits exploités par la municipalité et enfin, de la possibilité d'intrusions salines, le suivi de la qualité de l'eau à la sortie des puits est crucial pour assurer une gestion efficace en cas d'alerte. Le suivi des nitrates, indicateurs de pollution liés aux installations septiques ou à l'épandage d'engrais azotés, celui des hydrocarbures, indicateurs de pollution d'origine industrielle et celui des chlorures, indicateur d'une pollution par les sels de déglçage ou de remontées salines seraient également appropriés.

**FAITS SAILLANTS**

- ➔ Le réseau hydrographique des Îles est peu développé, les cours d'eau non intermittents sont peu nombreux et l'eau de surface peu abondante. De ce fait, les eaux souterraines représentent une ressource qui doit être qualifiée d'irremplaçable, car elle est la seule source d'approvisionnement en eau.
- ➔ Le Membre de l'Étang-des-Caps constitue la seule formation rocheuse capable de fournir de forts débits de pompage. Son étendue spatiale (verticale et latérale) et ses caractéristiques hydrologiques en font un aquifère idéal.
- ➔ La recharge des aquifères varie annuellement selon la variabilité saisonnière et interannuelle des précipitations (neige et pluie).
- ➔ Pour modéliser les écoulements, comprendre la dynamique hydrologique et simuler des scénarios de pompage qui aident à la détermination des politiques de gestion des aquifères, les hydrogéologues du Groupe Madelin'Eau utilisent le modèle MODFLOW.
- ➔ Les modèles de transport et d'écoulement développés pour les Îles n'intègrent pas les phénomènes complexes de propagation de polluants dans les eaux souterraines.
- ➔ L'analyse du bilan hydrogéologique montre que la formation aquifère des grès rouges peut suffire aux besoins en eau actuels et futurs des habitants des Îles-de-la-Madeleine. Il serait possible de capter des volumes d'eau plus importants sans risquer d'épuiser la ressource et sans menace d'intrusions salines ceci dans la mesure où la répartition spatiale des puits et des volumes prélevés dans chacun des puits est optimisée.
- ➔ Le réservoir aquifère des grès rouges étant perméable, un lien hydraulique direct existe entre celui-ci et les eaux salées du golfe du Saint-Laurent qui entourent les Îles-de-la-Madeleine, augmentant le risque d'intrusion saline dans les réservoirs d'eau douce. Les pressions anthropiques et naturelles exacerbent cette vulnérabilité.
- ➔ Les ressources en eau ne sont pas uniquement vulnérables aux intrusions salines liées aux pressions naturelles et anthropiques, mais également à la présence de nombreuses sources de contamination potentielles dans les environs immédiats des puits municipaux.
- ➔ L'indice de vulnérabilité mesuré par la méthode DRASTIC est reliée aux propriétés du système sans égard aux activités polluantes qui seraient présentes et aux processus géochimiques impliqués dans la transformation des composés; il s'agit de vulnérabilité intrinsèque. L'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, combinée à l'inventaire des activités potentiellement polluantes permet de quantifier les risques de contamination.
- ➔ À l'état naturel, l'eau souterraine de l'archipel est de très bonne qualité. Certains éléments tels que le pH, les concentrations d'azote, de chlorure et des trihalométhanes sont cependant à surveiller plus attentivement.
- ➔ Les travaux réalisés au cours de la dernière décennie ont mis en évidence la nécessité absolue de bien gérer la ressource et de veiller à la bonne exploitation des puits ceci dans une perspective de développement durable.

### 3.8 RÉFÉRENCES

- 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.
- Castany, G. (1998). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris, 236 p.
- Comte, J.-C. (2008). Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires 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.
- Chouteau, M., Bouchedda, A. & Madani, A. (2011). Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine. Phase 2 : Caractérisation des sites : détermination des profils de références et de la méthodologie de suivi, 172 p.
- Ellis, D. (2012) Avis technique portant sur la problématique potentielle de dessalement des eaux aux Îles-de-la-Madeleine (N/Réf. : SCW-761066). 9 p.
- Gilliand, P. (1971). Étude hydrogéologique par sondage électrique des Îles-de-la-Madeleine, Géoterrex Ltée, Étude. pp. 85-158.
- Laferrière, M., Levallois, P. & Gingras, S. (1999). La problématique des trihalométhanes dans les réseaux d'eau potable s'alimentant en eau de surface dans le Bas St-Laurent. Vecteur Environnement, Section scientifique, mai 1999, pp. 38-43.
- Leblanc, Y. (1994). Analyse et modélisation numérique de huit puits de production sur l'Île du Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine – Essai de maîtrise présenté à Pierre Gélinas et Denis Isabel, Université Laval.
- Madelin'Eau.(2003). Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable – Rapport d'étape no 1 couvrant la période – Avril 2002 à mars 2003, présenté à la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine dans le cadre d'un financement provenant du Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD).
- Madelin'Eau.(2004). Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Un défi de développement durable – Rapport final – Document no 3 (archipel hors Île Centrale) – Partie A : île du Havre-Aubert, Partie B : Île de Havre-aux-Maisons, Partie C : Île de la Grande-Entrée, Partie D : Île de Grosse-Île, Partie E : Île d'Entrée, Partie F : île de Pointe-aux-Loups, présenté à la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine dans le cadre d'un financement provenant du Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD). 42 p.
- Madelin'Eau. (2007). Secteur Sud-Est de l'Île de la Grande-Entrée – Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines. Forages FE-06-03, FE-06-04, FE-06-05 ET FP-06-06, 95 p.
- Madelin'Eau. (2009). Secteur de la Grande-Entrée - Flanc Nord Alimentation en eau potable, Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines, 449 p.
- Madelin'Eau. (2011). Projet de réalisation d'un forage gazier vertical conventionnel d'une profondeur de 2500 mètres. Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Reconnaissance /identification des cibles les plus propices, rapport d'étape 1 expertise hydrogéologique, 84 p.

- Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP) (visité : 2012) Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (Région administrative 11) *in* Portrait régional de l'eau. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region11/11-gaspesie\(suite\).htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region11/11-gaspesie(suite).htm)
- Ministère de l'environnement du Québec (MENV), (1999). Guide de classification des eaux souterraines du Québec, 12 p.
- Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. (visité : 2012). Résultats d'analyses d'eau potable. *in* Eau potable [http://www.muniles.ca/services\\_travaux\\_eau\\_potable.html](http://www.muniles.ca/services_travaux_eau_potable.html).
- Omnès, G. (1976). Étude hydrogéologique complémentaire par sondages électriques Îles-de-la-Madeleine. Géoterrex Ltée, Étude 85-724.
- Pierre G. & Bernatchez P. (2009). Vulnérabilité à l'érosion côtière et à la submersion des étangs aérés du secteur de Fatima (Îles-de-la-Madeleine). Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis à la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 24 p.
- Poulin M. (1977). Étude hydrogéologique des Îles de Grosse-Île et de Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine. Service technique en Eau souterraine.
- Rodriguez (visité : 2012) Contribution de l'aménagement du territoire à la protection des sources souterraines d'eau potable. Forum L'eau souterraine, un patrimoine à connaître et à gérer, Amos, 18 et 19 mars 2011. Présentation ppt. [http://www.sesat.ca/RadDocuments/SESAT\\_Forum2011\\_M.J.Rodriguez-Pinzon.pdf](http://www.sesat.ca/RadDocuments/SESAT_Forum2011_M.J.Rodriguez-Pinzon.pdf)