

# Synthèse de l'état des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine

## Impacts de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles sur les eaux souterraines



Sous la direction de  
Gwénaëlle Chaillou, Ph. D.

Décembre 2012

**UQAR**

Université du Québec  
à Rimouski

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

### Coordination

**Gwénaëlle Chaillou**, Ph.D. Biogéochimiste professeur à l'UQAR  
Responsable du projet et rédaction  
Titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur géochimie des hydrogéosystèmes côtiers  
Département de biologie, chimie et géographie  
Université du Québec à Rimouski (UQAR)  
Courriel : gwenaelle\_chaillou@uqar.ca

### Analyse, recherche et rédaction

Maud Touchette, M.Sc. Pédologue - géographe, agente de recherche, UQAR  
Audrey M. Rémillard, M.Sc. Géomorphologue - géographe, agente de recherche, UQAR

### Analyse, rédaction et relecture

Thomas Buffin-Bélanger, Ph.D. Géomorphologue, professeur-chercheur, UQAR  
Richard St-Louis, Ph.D. Chimiste environnemental, professeur-chercheur, UQAR  
Bernard Héту, Ph.D. Géomorphologue, professeur-chercheur, UQAR

### Rédaction et relecture de la version finale

Guglielmo Tita, Ph.D. Biologiste, directeur général scientifique du CERMIM, professeur-chercheur, UQAR

### Cartographie

Marie-Andrée Roy, technicienne en géomatique, UQAR  
Maud Touchette, M.Sc. Pédologue - géographe, agente de recherche, UQAR

### Collaborateur

Luc Champagne, M.Sc. Hydrogéologue, agent de recherche, UQAR

### RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Chaillou, G., Touchette, M., Rémillard, A.M., Buffin-Bélanger, T., St-Louis, R., Héту, B. et Tita, G. 2012. *Synthèse de l'état des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine - Impacts de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles sur celles-ci*. Université du Québec à Rimouski, Département de biologie, chimie et géographie, Synthèse remise au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la faune et des Parcs (MDDEFP) et au Ministère des Ressources naturelles (MRN), Décembre 2012, 200 p.

Photographies de la page couverture : Tourisme Îles-de-la-Madeleine, Bernard Héту et Pascal Bernatchez

## **MISE EN GARDE**

Ce document a un objectif d'information. Il est remis conjointement au ministère du Développement durable de l'Environnement, de la Faune et des Parcs et au ministère des Ressources naturelles, et n'engage en rien ces derniers et les membres du comité évaluation. Ce document est une recension de la littérature. De ce fait, il présente un état des connaissances le plus exhaustif et objectif possible et en aucun cas il n'exprime les opinions ou les vues des auteurs. Toute référence à une loi ou une réglementation n'est présentée qu'à titre informatif. Ces références ne peuvent être utilisées pour prendre des décisions ou poser des actions. Les lecteurs et lectrices sont donc appelés à se référer aux textes de lois originaux pour obtenir des informations ayant force de loi.

## **REMERCIEMENTS**

L'équipe de réalisation désire dans un premier temps remercier le ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère des ressources naturelles (MRN), sans lesquels cette étude n'aurait pu être menée.

Merci aux membres de La table de Concertation sur les Hydrocarbures des Îles-de-la-Madeleine qui ont partagé leurs connaissances et préoccupations sur les ressources en eaux souterraines et sur l'exploration et l'exploitation des autres ressources non renouvelables. Nous tenons à remercier le CERMIM et son directeur général, Monsieur Guglielmo Tita, pour l'organisation de cette rencontre et pour l'information relative à la gestion des milieux insulaires.

Nous remercions la Municipalité des Îles-de-la Madeleine de nous avoir reçus et de nous avoir donné accès à de la documentation sur des projets de développement d'aqueducs municipaux et à de l'information sur l'hydrologie des Îles. Nous désirons remercier tout spécialement Monsieur Jean Richard, Directeur du service des Travaux publics, et Monsieur Jeannot Gagnon, Directeur du service du Développement du Milieu et de l'Aménagement du Territoire pour le temps qu'ils nous ont accordé et les échanges que nous avons eus. Merci à Benoit Boudreau, géomaticien de la municipalité des Îles, de nous avoir fourni les données sur l'occupation du territoire de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Merci aussi au groupe Madelin'Eau et à Monsieur Denis Richard de nous avoir éclairés sur leurs travaux réalisés cette dernière décennie aux Îles-de-la-Madeleine

Nous remercions aussi l'entreprise Gastem, son Président Monsieur Raymond Savoie et son directeur Monsieur David Vincent, pour le temps qu'ils nous ont accordé et les connaissances qu'ils nous ont apportées sur l'exploration du gaz naturel.

Merci à Madame Marie-Claude Théberge, Directrice par intérim à la Direction des évaluations environnementales du MDDEP, à Madame Édith Bourque et à Monsieur Michel Ouellet, du Service de l'aménagement et des eaux souterraines (SAES) du MDDEFP, de nous avoir donné accès aux documents, cartes et études nécessaires à la réalisation de cette synthèse. Merci à toute l'équipe du comité d'évaluation du document synthèse, provenant du MRN et du MDDEFP, pour leurs commentaires constructifs. Merci à Madame Christine Desjardins pour la révision linguistique du document. Merci aussi à Madame Céline Dupont, coordonnatrice au

développement à la Direction des évaluations environnementales du MDDEFP, et Guillaume Werstink, agent à la valorisation de la recherche et liaisons entreprise-université au Bureau du doyen des études de cycles supérieurs et de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), pour la gestion des affaires administratives liées au projet.

## **RÉSUMÉ**

Cette synthèse s'inscrit dans le cadre d'un projet mandaté par le ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère des ressources naturelles (MRN). L'objectif premier du projet vise à dresser un portrait clair et rigoureux de la situation de l'eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine en se basant sur les données scientifiques acquises ces dernières décennies. Cette synthèse considère les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine dans un contexte global en dressant des portraits géographique, climatique et hydrogéologique de l'archipel madelinot. Elle examine les activités d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles, même potentielles, qui pourraient altérer les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine. En guise de conclusion, des pistes de réflexion sont proposés pour développer et intégrer une gestion durable de la ressource en eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine.

## **Chapitre 1**

La gestion durable des ressources en eau souterraine est un enjeu mondial. En milieu insulaire, cet enjeu est exacerbé puisque l'eau douce de l'aquifère est en contact permanent avec l'eau salée de l'océan qui l'entoure. La nappe d'eau douce « flotte » sur une nappe d'eau salée avec pour seule séparation une zone de transition d'eau saumâtre. Les intrusions salines et la salinisation sont les plus importantes formes de contamination des aquifères côtiers dans le monde. Comme tous les systèmes aquifères, les aquifères côtiers et insulaires sont aussi sensibles aux pollutions diffuses liées aux activités anthropiques à la surface ainsi qu'à celles qui s'exercent directement en profondeur. Bien que l'impact des changements climatiques globaux soient encore peu observables dans les systèmes aquifères, le groupe d'experts international sur les changements climatiques (ou GIEC) ainsi que de nombreux organismes gouvernementaux et autres appréhendent d'importants changements dans la dynamique des aquifères côtiers insulaires à long terme. La hausse du niveau marin, les changements dans les régimes de précipitation, l'accroissement de l'érosion côtière sont autant de facteurs contrôlant la recharge et la capacité de réserve de ces systèmes. Ces changements pourraient altérer non seulement la ressource en eau douce propre à la consommation, mais aussi les écosystèmes de surface qui sont dépendants des échanges avec les eaux souterraines.

La gestion durable des eaux douces des aquifères côtiers et insulaires est un enjeu mondial. Toutes les études s'accordent à dire que leur gestion s'appuie sur une bonne connaissance de la

ressource en termes de comportement hydrodynamique, de recharge ou de renouvellement de la ressource et de vulnérabilité aux contaminations, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique. Sur cette base de compréhension entre potentiel et vulnérabilité, les politiques de gestion durable doivent être menées en considérant toutes les variables externes qui forcent le système et les contraintes internes qui affectent la ressource. Les Îles-de-la-Madeleine ne font pas exception, en ce sens que la gestion durable de leurs aquifères représente un enjeu majeur pour le développement économique, touristique et humain de la communauté.

## **Chapitre 2**

La géologie joue un rôle primordial dans toutes les phases d'exécution d'un programme de mise en valeur des ressources en eau. Celle des Îles-de-la-Madeleine possède une histoire 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 du Havre-Aubert, du Cap-aux-Meules et du 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.

Le développement du sol et l'occupation du territoire sont aussi des facteurs qui conditionnent les processus hydrogéologiques tels que le ruissellement de surface, l'alimentation et la décharge des nappes.

Aux Îles-de-la-Madeleine, 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. Ce dernier siècle, l'occupation des sols a beaucoup évolué : aujourd'hui plus de la moitié du territoire est occupé soit par des zones de conservation soit par des zones rurales. Il n'existe aucune donnée sur le rôle de l'occupation des sols sur la dynamique hydrogéologique des aquifères des Îles-de-la-Madeleine. De plus, l'augmentation de la population et par le fait même de l'urbanisation a accru les besoins en eau douce et potable tout en augmentant la superficie des zones imperméables.

Finalement, mentionnons que du fait de son insularité, le territoire des Îles-de-la-Madeleine est soumis à de nombreux forçages naturels (changements climatiques et modification du régime de précipitations, érosion et recul des côtes, submersion) et anthropiques (artificialisation des côtes, contaminations potentielles, exploitation de la ressource en eau souterraine, activités minières) qui influencent directement ou indirectement les ressources en eaux souterraines.

### **Chapitre 3**

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 douce. Le Membre de l'Étang-des-Caps (grès rouges) 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 et d'exploitation des aquifères, les hydrogéologues du Groupe Madelin'Eau utilisent le modèle numérique MODFLOW. Ce modèle, développé pour l'étude du transport et d'écoulement des eaux souterraines aux Îles, n'intègre pas les phénomènes complexes de propagation de polluants dans les nappes souterraines. L'analyse des résultats de modélisation ainsi que le bilan hydrogéologique de l'Archipel montrent que la formation aquifère des grès rouges peut suffire aux besoins en eau actuelle et futur des habitants des Îles-de-la-Madeleine. Il serait même 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.

Comme le réservoir aquifère des grès rouges est 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 sont aussi vulnérables à la contamination liée aux activités de surface. Pour diminuer ce risque, des périmètres de protection sont instaurés dans les environs immédiats des aires d'alimentation des



puits municipaux. Cette vulnérabilité est mesurée par la méthode DRASTIC. Cette méthode conventionnelle est basée sur les propriétés du système, sans égard aux activités polluantes qui seraient présentes et aux processus géochimiques impliqués dans la transformation des composés; il s'agit donc d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque au système. Les indices DRASTIC calculés dans les différents puits municipaux et privés sont tous supérieurs à 100, ce qui indique que les aquifères, et plus particulièrement l'aquifère de grès rouge, sont relativement vulnérables aux activités à risques et potentiellement polluantes ayant lieu à la surface du sol.

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. En tenant compte du caractère vulnérable de la formation aquifère des grès rouges, de la présence de nombreuses activités susceptibles d'émettre des contaminants 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 de la ressource.

#### **Chapitre 4**

Aux Îles-de-la Madeleine, les eaux souterraines sont la seule source d'eau potable et l'utilisation de cette ressource est un enjeu majeur, ce qui implique que le développement d'activités d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles doit être réfléchi et géré dans un cadre particulier et dans une optique de développement durable. Les ressources naturelles sont diversifiées, mais restreintes sur les Îles-de-la-Madeleine. Les quatre ressources continentales principales sont la forêt, la faune, les mines, et l'énergie. En ce qui concerne l'exploitation des gravières et sablières, aucune anomalie en lien avec ces activités n'a été rapportée dans les études hydrogéologiques aux Îles-de-la Madeleine. Ces mêmes études ne rapportent pas non plus d'anomalie en lien avec l'exploitation des gisements de sel par la compagnie Mines Seleine, outre l'incident ayant provoqué l'inondation d'une partie des galeries en 1995.

De nombreuses études montrent la présence d'un potentiel en hydrocarbure, notamment en gaz naturel, dans la zone des structures salifères associée à la zone du Carbonifère supérieur. En effet, deux forages exploratoires réalisés sur la portion terrestre des Îles-de-la-Madeleine ont confirmé la présence d'indices de gaz naturel. Ce gaz potentiellement exploitable correspond à un gaz naturel conventionnel non associé. Les techniques de forage pour explorer et exploiter ces gisements sont conventionnelles. Les étapes de réalisation de l'exploration puis de l'exploitation, si le gisement s'avère intéressant, sont encadrées par des règlements et l'obtention de divers permis ou autorisations selon les travaux menés. Le Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les

réservoirs souterrains (RPGNRS) de la Loi sur les Mines du MRNF ainsi que la Loi sur la qualité de l'environnement du MDDEP encadrent chaque étape. Le Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains prévoient la fixation du coffrage de surface à une profondeur équivalente ou supérieure à 10% de la profondeur totale du puits, pour empêcher les fluides contenus dans les différents niveaux géologiques de se mélanger. Des mesures géophysiques spécifiques permettent de contrôler la qualité de ce coffrage. Les risques liés aux activités d'exploration se résument globalement aux risques potentiels liés à la contamination des eaux de surfaces, souterraines et du sol, au traitement et stockage des fluides de forage et des déblais et à la production et diffusion de gaz par la torchère qui peut engendrer des impacts sur l'environnement local. Les infrastructures mis en place pour l'exploitation dépendront du potentiel de développement de l'activité d'exploitation (locale ou de classe mondiale). Ces deux voies de développement engendrent des impacts différents sur les aquifères et doivent être considérées spécifiquement le cas échéant. Les infrastructures de transport et de stockage des gaz sont des éléments à risque de contamination des eaux souterraines. Leur installation autant que leur fermeture sont sujets à une réglementation qui limite ces risques. Quant au volume d'eau douce utilisé pour l'entretien de ces infrastructures, il peut être limité car l'eau salée peut lui être substituée. Notons que la subsidence est souvent rapportée comme une conséquence importante des activités d'exploitation de gisement de classe mondial. En zone côtière, ces mouvements de sols doivent être suivis et appréhendés.

Actuellement, cinq zones sont ciblées par l'entreprise Gastem Inc., qui a les droits de recherche et d'exploration exclusifs aux Îles-de-la-Madeleine. Ces cibles répondent à des critères établis conjointement par l'entreprise en hydrogéologie Madelin'Eau, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, et l'entreprise Gastem Inc. Ces critères permettent de s'assurer que les activités d'exploration et d'exploitation s'effectueraient avec un risque minimum sur l'aquifère; ils impliquent notamment que les cibles d'implantation soient situées à l'extérieur des limites exploitables de l'aquifère des grès rouges et d'être situées à proximité du littoral marin où l'interface eau douce/eau salée se situe près de la surface. Ces projets d'exploration sont potentiels et n'incluent actuellement aucun projet d'exploitation ou de distribution locale ou à l'extérieur de l'Archipel.

## **Chapitre 5**

Ce dernier chapitre présente la conclusion de la synthèse des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine. Les problématiques relatives à la gestion et à l'exploitation

des eaux souterraines concernent toutes les communautés côtières et insulaires tels qu'en témoignent les nombreuses études à ce sujet. Les eaux souterraines requièrent une gestion particulière et différente de celle des eaux de surfaces car les effets néfastes sur les aquifères peuvent prendre plusieurs années, voire plusieurs décennies avant de se manifester.

Les aquifères côtiers et insulaires de l'hémisphère nord comme ceux de l'hémisphère sud font face aux mêmes problématiques. Les différences locales sont induites par les facteurs climatiques, la géologie du système et le niveau de développement du pays. Comme tout milieu insulaire, le territoire des Îles-de-la-Madeleine est soumis à de nombreux forçages externes (naturels) et internes (anthropiques) qui influencent directement ou indirectement la qualité et la quantité des ressources en eaux souterraines. Dans la communauté scientifique internationale, il est généralement admis que la gestion de ces aquifères s'appuie sur une bonne connaissance de la ressource en termes de comportement hydrodynamique, de taux de recharge et de vulnérabilité à la contamination et à la pollution d'origine anthropique ou naturelle. Différents outils d'aide à la décision qui permettent de caractériser et de comprendre ces systèmes complexes et de répondre adéquatement aux problématiques mettant en jeu les eaux souterraines, sont disponibles pour les décideurs. L'utilisation de technologies alternatives est une alternative qui peut aider à diminuer les pressions (anthropiques et naturelles) qui s'exercent sur les eaux souterraines. Ces technologies permettent d'exploiter différemment les aquifères d'eau douce, de recycler les eaux grises ou même d'exploiter d'autres ressources telles que l'eau de mer et l'eau saumâtre. Par contre, malgré les efforts et les avancées technologiques, cette eau ne sera jamais d'aussi bonne qualité que l'eau « naturelle » provenant des aquifères.

Dans le contexte de mondialisation actuel, l'« indépendance énergétique » des milieux insulaires est un enjeu de taille. La décentralisation de l'énergie ainsi que l'élaboration de plans énergétiques régionaux, en considérant les besoins locaux mais aussi l'environnement, sont au cœur des politiques de gestion énergétique de nombreux États ou Territoires insulaires. Comment allier développement énergétique et gestion durable des eaux souterraines en milieu insulaire? La question reste ouverte.

L'archipel Madelinot fait aujourd'hui face à un double défis : celui d'assurer un développement tant social qu'économique et énergétique et celui de préserver la qualité et la quantité de son unique ressource en eau douce. Pour y répondre, de nombreuses initiatives sont mises en place par la Municipalité. Ces initiatives visent à 1) optimiser les prélèvements, 2) acquérir une bonne connaissance et compréhension de l'aquifère, 3) mettre en place un système de suivi de la qualité

de l'eau souterraine, 4) développer les actions participatives, et 5) informer et sensibiliser la population et les visiteurs à l'importance de préserver et de protéger la ressource eau souterraine. Finalement, il est impossible aujourd'hui d'avoir une vision sectorielle des ressources, particulièrement en milieu insulaire. Un maillage entre ces ressources et une réflexion commune sont nécessaires pour mettre en place une gestion durable et intégrée des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine.

## AVANT-PROPOS

Aux Îles-de-la-Madeleine, les réserves d'eau douce sont souterraines, sous forme de lentilles sous les Îles et dont le volume et l'extension spatiale sont en équilibre avec l'eau de mer sous-jacente. La préservation et la gestion de ces réserves, uniques sources d'approvisionnement en eau potable pour la population, sont un enjeu social et économique très préoccupant pour les autorités et les communautés locales, particulièrement dans un contexte de développement économique et possiblement d'activités d'exploration et d'exploitation gazière. Ce projet de recherche bibliographique s'inscrit dans une demande conjointe du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et du ministère des Ressources naturelles (MRN).

Le document de synthèse préparé par l'équipe du Département de biologie, chimie et géographie de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) présente un état de la situation des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine et des impacts potentiels, sur celles-ci, des activités liées à une éventuelle mise en valeur des ressources naturelles souterraines, notamment l'exploration et l'exploitation gazière. Il n'est en aucun cas une étude d'impact sur un projet déterminé. Le document se veut être une synthèse exhaustive des connaissances acquises ces 40 dernières années sur les aquifères côtiers et insulaires et plus particulièrement sur les aquifères des Îles-de-la-Madeleine. Il se base sur plus d'une vingtaine d'études et de rapports fournis conjointement par les deux ministères impliqués et sur plus d'une centaine d'articles scientifiques et mémoires de maîtrise et de doctorat. Il présente un état des connaissances le plus exhaustif et objectif possible et traite la ressource « eau souterraine » dans une approche systémique multidisciplinaire qui permet de la replacer dans un contexte global. Le document est conçu pour répondre aux besoins de connaissances des ministères et des décideurs afin de les aider à prendre des décisions, ainsi qu'aux communautés de l'archipel madelinot et des communautés côtières du Québec dépendantes des aquifères côtiers. Le document inclut des figures illustrant les concepts et les connaissances clés liés à la dynamique des eaux souterraines et à leur sensibilité face aux pressions naturelles et anthropiques que subissent et pourraient subir les Îles. Des cartes originales ont aussi été produites pour synthétiser les données acquises ces dernières années sur l'Archipel madelinot. Un lexique est fourni à la fin du document pour faciliter la compréhension des termes techniques et scientifiques.

## Table des matières - sommaire

ÉQUIPE DE RÉALISATION .....	ii
MISE EN GARDE .....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	vi
AVANT-PROPOS.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
CHAPITRE 1 Introduction générale .....	1
CHAPITRE 2 Portrait géographique des îles-de-la-madeleine.....	28
CHAPITRE 3 Les ressources en eau souterraine des îles-de-la-madeleine .....	67
CHAPITRE 4 Exploration et exploitation des ressources naturelles .....	108
CHAPITRE 5 Gestion durable de la ressource eau souterraine .....	159
ANNEXE 1 Les dépôts quaternaires .....	184
ANNEXE 2 Les sols.....	187
ANNEXE 3 Complément-dessalement de l'eau de mer .....	191
ANNEXE 4 Calendrier des rencontres .....	194
LEXIQUE.....	196

## Liste des figures

### CHAPITRE 1

Figure 1.1. Infiltration des eaux de surface et alimentation des réservoirs poreux souterrains. ....	6
Figure 1.2. Vue schématique du bilan hydrique à trois échelles spatiales interdépendantes.....	7
Figure 1.3. Pourcentage de la population canadienne tributaire de l'eau souterraine en 1996 .....	9
Figure 1.4. Trois cas simplifiés de diffusion de contaminant dans la nappe phréatique .....	13
Figure 1.5. Vue schématique de l'impact d'une élévation du niveau de la mer et d'une modification du trait de côte sur l'étendue d'un réservoir aquifère .....	15
Figure 1.6. Niveaux marins moyens dans six ports de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick et de l'Île-du-Prince-Édouard. ....	17
Figure 1.7. Taux régional d'augmentation du niveau marin relatif dû à l'ajustement isostatique estimé par le modèle Ice-5G.....	17
Figure 1.8. Impacts biophysiques et socio-économiques potentiels des changements climatiques en zone côtière.....	18
Figure 1.9. Vue schématique des relations entre aquifères côtiers confinés et libres, le milieu marin, et les différents types de décharges. ....	19
Figure 1.10. Résumé non exhaustif des variables et des contraintes qui affectent les aquifères côtiers. ....	20

### CHAPITRE 2

Figure 2. 1. Localisation et extension du bassin des Maritimes .....	31
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). ....	33
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 .....	34
Figure 2. 4. Sous-bassin des Îles-de-la-Madeleine. ....	35
Figure 2. 5. Répartition simplifiée des différentes formations géologiques des Îles-de-la-Madeleine	36
Figure 2. 6. Les formations géologiques et leurs fonctions globales de réservoir et d'écoulement.) .....	37
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).....	41
Figure 2. 8. A) Podzol humique à ortstein et B) Régosol alluvial .....	42

Figure 2. 9. Évolution de l’occupation du territoire de Cap-aux-Meules entre 1900 et aujourd’hui..... 45

Figure 2. 10. Les grandes affectations du territoire des Îles-de-la-Madeleine (inspirée d’Agglomération des Îles-de-la-Madeleine 2010). ..... 46

Figure 2. 11. Carte de l’occupation du territoire des Îles-de-la-Madeleine. .... 48

Figure 2. 12. Tendances des températures moyennes hivernales aux stations météorologiques de Sept-Îles, de Gaspé et des Îles-de-la-Madeleine. .... 51

Figure 2. 13. Hauteurs et tendances mensuelles de l’épaisseur du couvert nival pour la station des Îles-de-la-Madeleine..... 52

Figure 2. 14. Déformations caractéristiques des lignes de courant dans un aquifère au voisinage de puits.. 57

Figure 2. 15. Exemple de l’augmentation de la superficie de rabattement d’une nappe ..... 59

Figure 2. 16. Résumé des pressions et des contraintes qui affectent les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine. .... 61

**CHAPITRE 3**

Figure 3. 1. Carte géologique simplifiée des Îles-de-la-Madeleine et localisation des puits de captage municipaux..... 73

Figure 3. 2. Localisation et description de deux puits du RIES. .... 74

Figure 3. 3. Exemple de la dynamique des recharges des aquifères des Îles au cours de l’année 1980 s ..... 76

Figure 3. 4. Suivis piézométriques dans deux puits situés sur l’île de Grande-Entrée (A) secteur sud-est (B) secteur nord. .... 78

Figure 3. 5. Variation du niveau piézométrique de 1968 à 1986 à la station Boisville ..... 79

Figure 3. 6. Précipitations moyennes mensuelles de mai à mai sur la période 1983-1984 et 2010-2011. .... 79

Figure 3. 7. Vue schématique du bilan hydrologique et de la recharge des aquifères aux Îles-de-la-Madeleine..... 80

Figure 3. 8. Schématisation du principe de modélisation numérique des écoulements..... 81

Figure 3. 9. Comparaison entre les transmissivités extraites du modèle opéré par Madelin’Eau et celles interprétées par les essais de pompage..... 83

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. .... 83

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..... 85

Figure 3. 12. Séquence d’augmentation du débit de pompage et impact sur le déplacement du biseau salé dans l’aquifère de grès rouge. .... 90

Figure 3. 13. Comparaison de la salinité de la nappe dans la situation actuelle et selon le scénario d’un pompage de 20 ans..... 91

Figure 3. 14. Cartes des élévations de l’interface eau douce/eau salée..... 93



Figure 3. 15. Valeur et répartition du haut et bas de falaise dans le secteur de Fatima entre 1963 et 2008. .	94
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.....	97
Figure 3. 17. Aire d'alimentation et aires de protection. ....	98
Figure 3. 18. Aire d'alimentation des puits PU-5 et PU-6/île du Cap-aux-Meules .....	98
Figure 3. 19. Distribution des indices DRASTIC pour les puits municipaux sur l'ensemble des Îles de la Madeleine.....	102

#### CHAPITRE 4

Figure 4. 1. Carrière à Havre-aux-Maisons) .....	115
Figure 4. 2. Formation des diapirs salifères des Îles-de-la-Madeleine. ....	116
Figure 4. 3. Coupe géologique simplifiée des Îles-de-la-Madeleine. ....	116
Figure 4. 4. Exploitation de sel gemme par la compagnie Mines Seleine dans la Dune du Nord. ....	118
Figure 4. 5. Rabattement de la nappe phréatique lors de l'exploitation d'une mine.....	119
Figure 4. 6. Composition chimique typique du gaz naturel .....	120
Figure 4. 7. Chimie du gaz naturel et du pétrole.....	121
Figure 4. 8. Les gaz conventionnels et non conventionnels.....	122
Figure 4. 9. Forage de gaz conventionnel direct dans une poche de gaz.....	123
Figure 4. 10. Prospection géophysique du sous-sol. ....	124
Figure 4. 11. Vue schématique d'un forage terrestre de type conventionnel.....	126
Figure 4. 12. Vue schématique des techniques de tubage à triples parois pour éviter la migration de gaz ou de fluide vers les formations géologiques traversées et pour protéger les formations aquifères d'une contamination.....	126
Figure 4. 13. Cycle du fluide de forage et boue de forage.....	127
Figure 4. 14. Camions vibrosismiques munis de plaques vibrantes .....	133
Figure 4. 15. Géophones permettant d'enregistrer les échos réfléchis sous la surface par les ondes sismiques.....	133
Figure 4. 16. Principales étapes du traitement des fluides de forage .....	136
Figure 4. 17. Le forage directionnel horizontal (FDH).....	140
Figure 4. 18. Installation d'un gazoduc.....	140
Figure 4. 19. Schématisation des différentes potentialités de fuites le long d'un puits hors d'usage.....	144
Figure 4. 20. Localisations de la zone d'intérêt pour l'exploration du gaz naturel aux Îles-de-la-Madeleine par Gastem et des cinq cibles potentielles de forage.....	147
Figure 4. 21. Vue aérienne des deux secteurs étudiés par Madelin'Eau pour l'exploration gazière par Gastem. ....	149

Figure 4. 22. Localisation de la mine de sel, des terrains contaminés non réhabilités, des potentiels sites de forages et des zones de captages et puits privés..... 153

**CHAPITRE 5**

Figure 5. 1. Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines ..... 163

Figure 5. 2. Le modèle DPSIR..... 164

Figure 5. 3. Exemple d’une variante du modèle DPSIR : la chaîne de causalité utilisée par le GIWA ..... 165

Figure 5. 4. Exemple d’une variante du modèle DPSIR : la chaîne de causalité utilisée par le NERI..... 165

Figure 5. 5. Stockage d’eau recyclée en aquifères, usine de Bolivar, Adélaïde, Australie..... 167

Figure 5. 6. Distribution des indices DRASTIC pour les puits municipaux sur l’ensemble des Îles-de-la-Madeleine..... 176

Figure 5. 7. Diagramme résumant les impacts potentiels environnementaux reliés aux **aléas** naturels et aux infrastructures nécessaires aux phases d’exploration et d’exploitation du gaz naturel pouvant affectés les eaux souterraines..... 178

## Liste des tableaux

### CHAPITRE 2

Tableau 2. 1. Nomenclatures géologiques et stratigraphiques des principales unités permo-carbonifères des Îles-de-la-Madeleine. ....	32
Tableau 2. 2. Légende des sols des Îles-de-la-Madeleine.....	43
Tableau 2. 3. Liste des terrains contaminés et non réhabilités de l'agglomération des Îles-de-la-Madeleine. ....	57

### CHAPITRE 3

Tableau 3. 1 Système de classification des eaux souterraines. ....	71
Tableau 3. 2. Résumé des caractéristiques géologiques et hydrologiques des principales formations rocheuses et meubles des Îles-de-la-Madeleine. ....	72
Tableau 3. 3. Bilan hydrogéologique pour les aquifères les plus sollicités .....	88
Tableau 3. 4. Tableau de synthèse des données sur différents puits municipaux. ....	101

### CHAPITRE 4

Tableau 4. 1. Portrait des ressources naturelles continentales des Îles-de-la-Madeleine.....	112
Tableau 4. 2. Résumé des droits miniers actuellement en vigueur sur le territoire terrestre des Îles-de-la-Madeleine.....	113