

# Chapitre 1

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

# CHAPITRE 1 TABLE DES MATIERES

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJET DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 ORGANISATION DU DOCUMENT DE SYNTHÈSE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 L'EAU SOUTERRAINE : UNE DENRÉE RARE ET PRÉCIEUSE .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 L'eau souterraine et le cycle hydrologique .....	5
1.3.2 L'eau souterraine : son utilisation .....	8
<b>1.4 VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS ET INSULAIRES .....</b>	<b>9</b>
1.4.1 Intrusions salines .....	9
1.4.2 Processus et transformations chimiques du mélange eau douce/eau salée .....	11
1.4.3 Pollutions diffuses par les activités anthropiques .....	12
1.4.4 Impacts des changements climatiques .....	13
1.4.5 Décharges des aquifères : un impact local, des répercussions globales .....	18
1.4.6 La gestion des aquifères côtiers : un enjeu mondial .....	19
<b>FAITS SAILLANTS.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Références .....</b>	<b>24</b>

« *L'Eau de boisson saine est le plus beau cadeau que l'être humain peut offrir à son semblable* »  
*Écocivisme, Collection Eau douce, Environnement Canada, novembre 1992*

---

La gestion durable des ressources en eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine est un enjeu majeur pour le développement économique, touristique et humain de l'archipel. La situation insulaire fait que les aquifères, qui renferment l'eau douce et potable, sont partout en contact avec le littoral et donc avec l'eau salée. La compréhension du lien entre le potentiel d'exploitation ou de consommation de cette ressource et sa vulnérabilité est essentielle pour gérer ces aquifères, considérés comme hautement vulnérables et irremplaçables.

### 1.1 OBJET DE L'ÉTUDE

L'objectif de l'étude, mandatée conjointement par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et par le ministère des ressources naturelles (MRN), est de présenter 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. Le document sera accessible aux décideurs gouvernementaux et locaux ainsi qu'aux citoyens des communautés côtières et des Îles-de-la-Madeleine en particulier. *Cet effort de synthèse et d'analyse des connaissances existantes a pour but de fournir aux divers intervenants les données scientifiques acquises ces dernières décennies sous une forme accessible et objective afin qu'ils puissent définir leurs priorités d'intervention. C'est également l'occasion de dresser un portrait multidisciplinaire clair et rigoureux de la situation de l'eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine.*

### 1.2 ORGANISATION DU DOCUMENT DE SYNTHÈSE

Dans ce **chapitre introductif**, nous nous appliquons à préciser la problématique mondiale des aquifères côtiers. Nous rappelons que les aquifères côtiers sont des systèmes particulièrement sensibles et qu'il est nécessaire non seulement de comprendre leur fonctionnement, mais aussi de développer des outils de surveillance pour assurer leur préservation et leur pérennité. Alors que les régimes hydrologiques, l'érosion continentale, et l'élévation du niveau marin sont hors de contrôle des intervenants, de nombreux auteurs s'entendent sur les actions « politiques » qui devraient être mises en place pour une gestion durable de ces systèmes.

Dans le **deuxième chapitre**, nous dressons un portrait géographique des Îles-de-la-Madeleine en nous intéressant, dans un premier temps, au contexte géologique, mais aussi à la couverture des sédiments **quaternaires**<sup>1</sup> et des sols. [Un document détaillé est aussi intégré en annexe pour de plus amples renseignements sur le sujet]. Nous portons un regard particulier sur l'occupation actuelle des sols et l'urbanisation qui influence grandement la répartition des prélèvements d'eau au sein de l'**aquifère** et à la qualité de la ressource. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux facteurs de stress présents aux Îles-de-la-Madeleine, aux pressions anthropiques qui sont liées à l'exploitation de la **nappe d'eau**, aux activités susceptibles d'altérer la ressource mais aussi aux pressions naturelles qui s'exercent sur le milieu.

Dans le **troisième chapitre**, nous présentons 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, mandatées 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 retraçons l'historique de la contamination des eaux souterraines pour conclure avec les principaux risques actuels de contamination de cette ressource.

Dans le **quatrième chapitre**, nous dressons un portrait des activités d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles (autres que l'eau) dans l'archipel. Notre étude se limite aux ressources de type continental et exclut donc les activités maritimes. Nous présentons la répartition de ces ressources ainsi que les activités d'exploitation en cours aux Îles-de-la-Madeleine en relation avec la ressource en eau souterraine. Puis nous nous intéressons à une ressource potentiellement exploitable et dont le développement suscite de nombreuses réactions : le gaz naturel. Nous présentons tout d'abord un état des connaissances sur le potentiel gazier de l'archipel avant de décrire les différentes étapes et procédés qui mènent à l'exploration et à l'exploitation de cette ressource naturelle.

Dans le **cinquième chapitre**, qui conclut cette synthèse des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine, nous portons un regard international sur la gestion durable des aquifères côtier et insulaire. Dans un premier temps, nous présentons différentes mesures de

---

<sup>1</sup> Les mots en gras dans le texte sont décrits dans le lexique inséré à la fin du document.

protection, de conservation et de gestion des eaux souterraines. Nous mettons aussi en exergue l'enjeu majeur de ces territoires : concilier développement énergétique, qui est essentiel à leur développement, et protection des ressources en eaux douces de bonne qualité. Dans un deuxième temps, nous nous intéressons spécifiquement à la gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine et aux enjeux face au développement d'activités d'exploration ou d'exploitation du gaz naturel sur la portion continentale de l'archipel.

Un **lexique** est présenté à la fin du document pour faciliter la compréhension des termes techniques et scientifiques. Ce lexique regroupe les mots signalés **en gras** dans le document.

## **1.2 L'EAU SOUTERRAINE : UNE DENRÉE RARE ET PRÉCIEUSE**

### **1.2.1 L'eau souterraine et le cycle hydrologique**

Nous vivons sur une planète constituée à 70 % d'eau. Cependant, la grande majorité de cette eau est salée et se trouve dans les océans alors que seulement 5 % des eaux terrestres sont douces. De ces eaux douces, 69 % sont sous forme de précipitations et seulement 1 % sous forme d'eaux de surface, emmagasinées dans les lacs ou s'écoulant dans les cours d'eau. Les 30 % restant s'accumulent dans des réservoirs poreux et constituent les eaux souterraines. Ces réservoirs sont alimentés par gravité; les eaux s'infiltrent de la surface jusqu'à ces réservoirs souterrains qui se déchargent éventuellement dans les lacs, les rivières et l'océan côtier (figure 1.1).

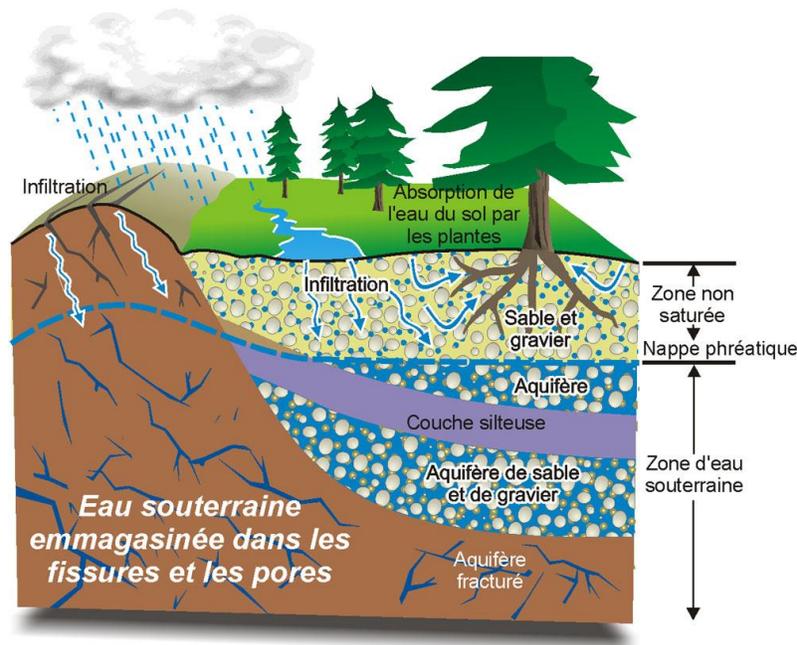


Figure 1.1. Infiltration des eaux de surface et alimentation des réservoirs poreux souterrains, les aquifères (tirée Ressources Naturelles Canada, 2012).

Selon la loi de conservation de la masse du cycle hydrologique (toute perte en eau d'un réservoir est compensée par un gain dans un réservoir adjacent), le volume d'eau disponible dans le réservoir souterrain dépend des entrées d'eau (précipitations et infiltrations) et des sorties (évaporation, transpiration, ruissellement de surface, écoulements de subsurface et souterrains, décharges). La figure 1.2 résume les échanges qui ont lieu à différentes échelles spatiales interdépendantes : i) l'échelle du bassin versant ou du réseau hydrologique représentant l'ensemble de la zone géographique continentale liée à l'aire de capture et de drainage des précipitations (Ramade, 1993); ii) l'échelle du réseau hydrogéologique qui correspond à la partie souterraine du réseau hydrologique; iii) l'échelle de l'aquifère qui est un corps de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage d'une quantité d'eau appréciable (Castany, 1998).

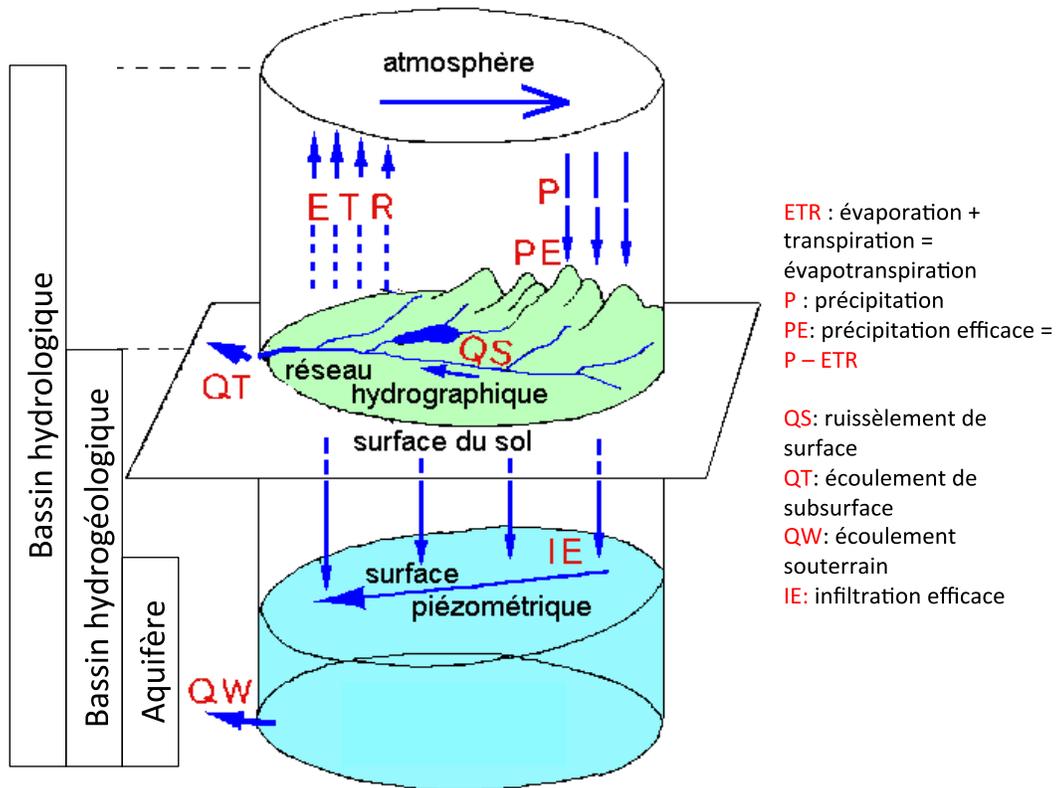


Figure 1.2. Vue schématique du bilan hydrique à trois échelles spatiales interdépendantes, le bassin hydrologique ou bassin versant, le bassin hydrogéologique et l'aquifère (modifiée de Castany, 1998). (Pour une visualisation du cycle hydrologique, nous vous recommandons de consulter le site d'Environnement Canada : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1267805731369&lang=fra>).

À l'échelle mondiale, les experts estiment qu'environ 70 % des précipitations continentales s'évaporent, 26 % ruissellent à la surface et 11 % s'infiltrent dans le sol (Baumgartner & Reichel, 1975). Ces chiffres varient significativement selon la latitude des systèmes étudiés. Les réserves d'eaux souterraines au Québec sont alimentées annuellement par un flux d'environ  $15 \text{ km}^3$  de précipitation, dont moins de  $0,43 \text{ km}^3$  s'infiltrent et sont captés, ce qui représente une infiltration de moins de 3 % des précipitations moyennes annuelles (Arcand *et al.*, 2002). En plus des fluctuations interannuelles, sur les continents de l'hémisphère nord, on observe aussi un effet saisonnier global principalement dû au stockage de l'eau sous forme de neige pendant la saison hivernale. Cette saisonnalité s'observe sur les niveaux d'eau au sein des aquifères. Les niveaux sont généralement plus élevés à la suite du dégel du printemps et plus bas à la fin de l'été. Ces variations sont généralement de l'ordre du mètre.

### 1.3.2 L'eau souterraine : son utilisation

Le volume des réserves mondiales d'eau souterraine est jusqu'à cent fois plus important que le volume d'eau douce de surface. L'augmentation de la demande en eau douce, depuis les années 1950, se traduit par une augmentation de l'utilisation de cette ressource. À l'échelle mondiale, cette ressource est utilisée à 25 % pour l'alimentation en eau potable (PNUE, 2003).

Au Canada, près de 9 millions de citoyens sont aujourd'hui tributaires des eaux souterraines, soit plus de 30 % de la population (Environnement Canada, 2009). Ce pourcentage s'élève entre 50 % et 100 % dans les Maritimes et les régions rurales du Québec (Secrétariat du comité des priorités du ministère du Conseil exécutif, 1997; figure 1.3). Au Québec, c'est 27,7 % de la population totale qui est tributaire de cette ressource (Environnement Canada, 2007). Cette proportion varie régionalement. Elle est de 60 % en Abitibi-Témiscamingue (ABQ, Gestion de l'eau, 1999) et grimpe à 100 % dans l'archipel des Îles-de-la-Madeleine (Madelin'Eau, 2004). L'eau souterraine constituant une source d'alimentation en eau potable de bonne qualité, relativement accessible et souvent trouvée quantité appréciable. Son utilisation est actuellement en augmentation au Québec.

En exploitant la ressource souterraine à des fins de consommation humaine ou d'activités industrielles et agricoles, nous la rendons directement vulnérable aux problèmes de surexploitation, de pénurie, de contamination, voire de **pollution**, et nous fragilisons indirectement les écosystèmes qui en sont tributaires (les zones de décharge de surface). Par exemple, le pompage excessif et l'aménagement de barrages et de systèmes de distribution en surface peuvent provoquer une baisse du niveau des nappes d'eau qui peut se traduire par une inversion des écoulements d'eau dans le système (Smith, 1994; Darnault & Godinez, 2008). En milieu côtier, où l'eau salée de l'océan est proche, cette inversion peut provoquer la **salinisation** des aquifères.

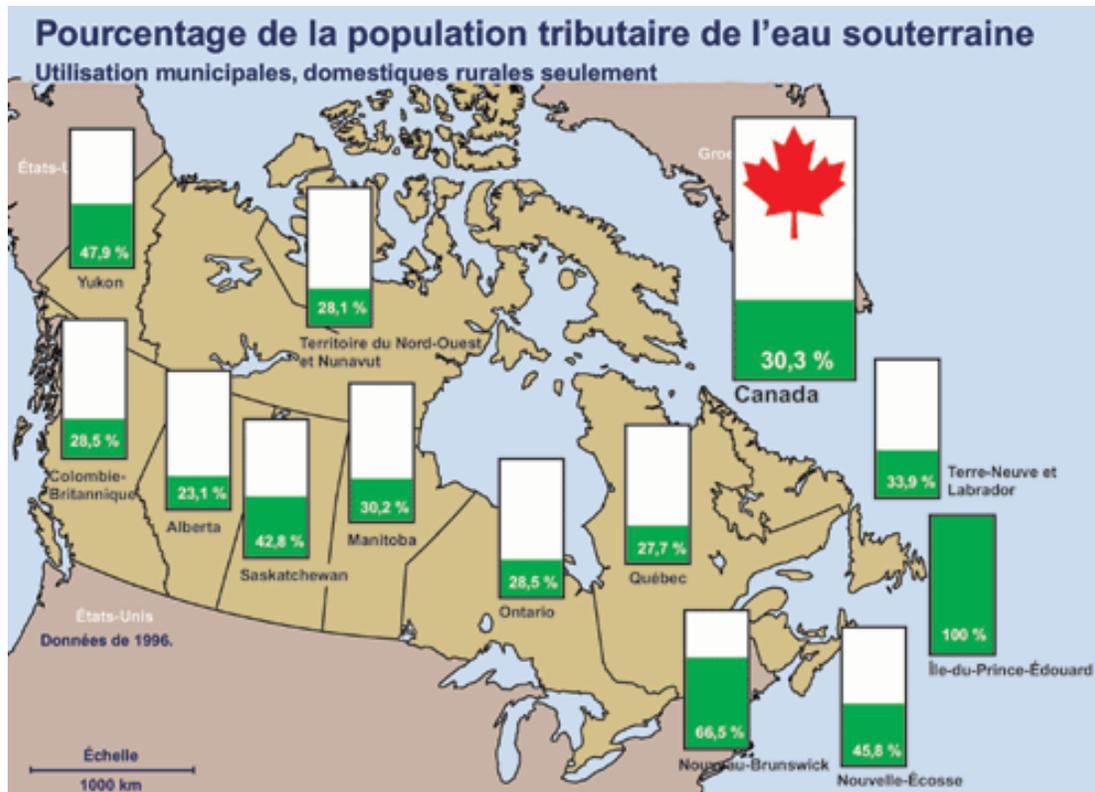


Figure 1.3. Pourcentage de la population canadienne tributaire de l'eau souterraine en 1996 (tirée d'Environnement Canada, 2012)

## 1.4 VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS ET INSULAIRES

Les zones côtières accueillent près de la moitié de la population mondiale. L'établissement de cette population engendre irrémédiablement le développement d'activités économiques qui nécessitent de l'eau douce. L'extraction d'eau souterraine pour soutenir les besoins domestiques, agricoles et industriels accrus devient un enjeu majeur dans les zones côtières. En milieu insulaire, cet enjeu est exacerbé puisque l'eau douce de l'aquifère insulaire 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** (White & Falkland, 2010).

### 1.4.1 Intrusions salines

Dans des conditions naturelles, l'écoulement de l'eau douce des aquifères insulaires et côtiers vers l'océan environnant est assuré par le **gradient hydraulique**. Ce gradient étant souvent faible, une extraction excessive de l'eau souterraine modifie l'**équilibre hydrostatique** et

favorise l'intrusion d'eau salée. La salinisation des aquifères côtiers est reconnue comme la plus grande forme de contamination des eaux (Richter & Kreitler, 1993). Des intrusions salines sporadiques, c'est-à-dire un déplacement vers l'intérieur des terres de la limite eau douce/eau salée, peuvent s'avérer néfastes et dommageables pour la qualité (chimie) de l'eau. Une migration permanente du **biseau salé** ou encore un **cône de remontée saline** sous un puits sont des situations irrémédiables pour les consommateurs qui se voient privés de leur ressource en eau potable.

Des cas de salinisation des aquifères côtiers ont été documentés sur pratiquement tous les continents: sur la côte atlantique américaine (Barlow, 2003; Smith, 1988; 1994; Snyder *et al.*, 2004), en Californie (Cardona *et al.*, 2004), en Corée (Park *et al.*, 2005), au Japon (Hiroshiro *et al.*, 2006), aux Pays-Bas (Oude Essink, 2001; Post, 2004), en Afrique du Nord et autour du bassin Méditerranéen (Paniconi *et al.*, 2001; Petalas & Lambrakis, 2006), en France (Barbecot *et al.*, 1997; De Montety *et al.*, 2008). Les aquifères insulaires des **atolls** coralliens de l'Océanie ainsi que les Îles méditerranéennes sont aussi sous étroites surveillances (UNESCO, 1991; White & Falkland, 2010; Kampioti & Stephanou, 2002). Si aucun cas **d'intrusion saline** majeure n'a encore été observé dans les aquifères côtiers de l'Est du Canada et du Québec, des intrusions salines ponctuelles sont enregistrées à l'Île-du-Prince-Édouard (Barlow & Reichards, 2010), des cônes de remontées salines ont été mis en évidence sous certains puits aux Îles-de-la-Madeleine (Gilliand, 1971) et une migration du **front salin** vers l'intérieur des terres a aussi été rapportée pour l'Île du Cap-aux-Meules aux Îles-de-la Madeleine (Comte, 2008).

Dans de nombreux cas, comme dans l'Est du Canada, le secteur contaminé par l'eau salée se limite à de petites parties d'un aquifère et à des puits particuliers, ce qui a peu ou pas d'effet sur l'ensemble des approvisionnements en eau souterraine. Dans d'autres cas, comme en Floride ou encore autour du bassin méditerranéen, la salinisation de la nappe d'eau est régionale et a entraîné la fermeture de puits et l'installation de dispositifs et d'aménagements spécifiques (aménagement pour aider à l'infiltration des eaux de surface et à la recharge locale de la nappe, extraction locale des eaux salées, *etc.*). La variabilité des contextes géologiques, la distribution spatiale de l'eau salée et l'historique des prélèvements d'eau souterraine et du drainage des eaux de surface se sont traduits par une variété de types d'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers. Dans certains cas, la salinisation s'est produite le long de forages non tubés (voir Chapitre 4), ou dans des puits abandonnés, mal construits ou corrodés qui permettent une migration verticale des eaux salées vers l'aquifère sus-jacent.

### 1.4.2 Processus et transformations chimiques du mélange eau douce/eau salée

L'effet le plus visible d'une intrusion saline dans un aquifère côtier ou insulaire est l'établissement d'un gradient de salinité de la côte vers l'intérieur de l'aquifère. La salinité, ou la concentration en ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans les eaux, sont un indice de cette pénétration. Le seuil de concentration des ions  $\text{Cl}^-$  fixé par l'Agence de Protection de l'Environnement est de 0,5 g/l pour que l'eau soit potable (la concentration de l'eau de mer est de 30 à 35 g/l). Pour Santé Canada, la concentration en ions  $\text{Cl}^-$  doit être inférieure à 0,250 g/l (Santé Canada, 2012). Par ailleurs, la salinisation de la masse d'eau entraîne tout un cortège de réactions chimiques et de processus dont il faut tenir compte puisqu'ils peuvent affecter la qualité de l'eau souterraine. Ces processus incluent des échanges ioniques entre les composés majeurs de l'eau douce (calcium,  $\text{Ca}^{2+}$ , et ion bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$ ) et ceux de l'eau de mer (chlorure  $\text{Cl}^-$ , sodium  $\text{Na}^+$  et magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ ), mais aussi des processus de précipitation et dissolution ou encore de réduction et d'oxydation.

La formation de composés organo-halogénés est une autre conséquence importante à l'intrusion d'eau salée. Les composés organo-halogénés sont des hydrocarbures halogénés de formule brute  $\text{C}_x\text{H}_y\text{X}_z$ , X correspondant à un élément du groupe chimique des halogènes : fluor (F), chlore (Cl), brome (Br) ou iode (I). Ces composés formés à partir de substitutions entre les éléments halogénés de l'eau de mer et les composés organiques présents dans l'eau souterraine sont des produits non **miscibles** plus denses que l'eau et constituent une source importante de contamination, surtout par les trihalométhanes (THM) dont le trichlorométhane (aussi connu sous le nom de chloroforme et de méthane trichloré). Ces composés organo-halogénés sont sous haute surveillance dans les eaux de consommation des aquifères côtiers car ils sont reconnus comme cancérigènes. Les concentrations maximales admissibles de THM totaux pour les eaux destinées à la consommation sont de l'ordre de 80  $\mu\text{g/L}$  aux Etats-Unis (EPA, 1998) à 100  $\mu\text{g/L}$  en France (Code la santé publique, 2007). Au Canada et au Québec, la norme seuil est de 80  $\mu\text{g/L}$  de THM totaux sur une moyenne annuelle des quatre derniers prélèvements trimestriels (MDDEFP, règlement sur la qualité de l'eau potable; Santé Canada, 2006). Au Québec, un suivi des THM totaux de 2004 à 2006 a montré que cette valeur est ponctuellement dépassée dans l'eau potable de toutes les régions, sauf celle de Laval (Buteau & Bourgault, 2010). La formation naturelle de ces composés semble principalement liée à la concentration en matière organique dans les aquifères (Hopple *et al.*, 2007). Comme pour les réactions précédentes, les caractéristiques géologiques des aquifères côtiers semblent ici encore le principal facteur contrôlant la formation de composés organo-halogénés en cas de salinisation du système. Aux processus naturels

s'ajoutent les réactions chimiques qui se produisent lors de la chloration de l'eau pour la désinfection avant la distribution pour la consommation; c'est un mécanisme chimique bien connu du traitement des eaux brutes continentales et qui expliquerait les valeurs maximales rapportées par l'étude de Burteau & Bourgault (2010). Par contre, en zones côtières et insulaires, ces réactions sont amplifiées si la présence de brome est accrue dans l'eau brute par une intrusion saline; ce mécanisme a été démontré pour l'eau potable de villes côtières en Grèce (Kampioti & Stephanou, 2002). Aux Îles-de-la-Madeleine, il n'y a pas de chloration de l'eau dans le réseau de distribution municipal en raison de la bonne qualité actuelle de l'eau brute.

Pour le Québec, toutes les normes de concentrations des composés organiques et inorganiques, ainsi que les normes bactériologiques sont accessibles sur le site du MDDEFP (<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/>).

### **1.4.3 Pollutions diffuses par les activités anthropiques**

Comme pour tous les systèmes aquifères, les aquifères côtiers et insulaires sont sensibles aux pollutions diffuses qui s'exercent en surface ainsi qu'à celles qui s'exercent directement en profondeur. Cinq grandes classes d'activités peuvent être responsables de ces pollutions (Environnement Canada, 2004):

- i) occupation et transformation des sols (agriculture, foresterie, irrigation, barrage, *etc.*);
- ii) urbanisation et développement municipal (extraction d'eau, aqueduc, fosse septique, *etc.*);
- iii) développement industriel (perte ou déversement de produits, injection souterraine, *etc.*);
- iv) développement d'exploitation minière (cendres volantes des centrales thermiques, zone de stockage et déversement d'hydrocarbures, *etc.*);
- v) transport (stockage du sel pour les routes, ruissellement sur les infrastructures routières, *etc.*).

Selon leur nature chimique, les contaminants qui atteignent la nappe d'eau souterraine se retrouveront soit dissous dans l'eau ou, s'ils sont non miscibles avec l'eau, flottant à la surface de la nappe pour les contaminants moins denses que l'eau ou ils s'accumuleront au fond de l'aquifère s'ils sont plus denses (Figure 1.4).

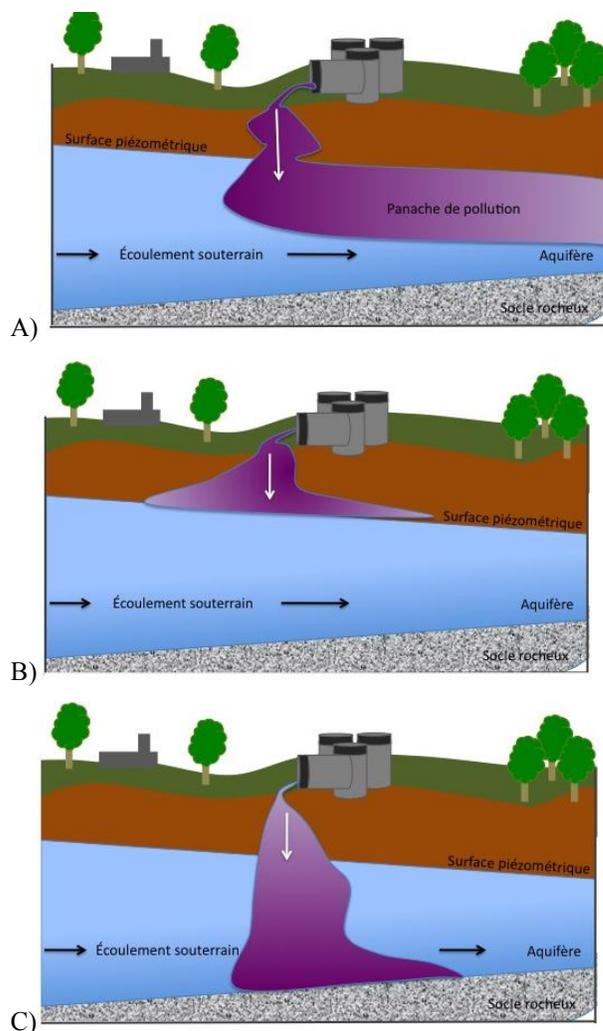


Figure 1.4. Trois cas simplifiés de diffusion de contaminant dans la nappe phréatique : a) diffusion d'un contaminant soluble comme les nitrates ou les sels déglacant; b) diffusion d'un contaminant non soluble et moins dense que l'eau, comme les hydrocarbures; c) diffusion d'un contaminant non soluble et plus dense que l'eau, comme le chloroforme. (modifiée de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, 2002).

Pour en savoir plus sur les sources potentielles de contamination et de pollution diffuse et ponctuelle des eaux souterraines, les lecteurs peuvent consulter les références suivantes : Environnement Canada, 2004 et Lemièrre *et al.*, 2001. Dans le cadre de notre étude, une liste exhaustive des sources potentielles de contamination est présentée au Chapitre 2.

#### 1.4.4 Impacts des changements climatiques

##### 1.4.4.1 Modification de la recharge des aquifères

Les variabilités climatiques locales couplées aux changements globaux vont irrémédiablement modifier les caractéristiques des principales composantes du cycle hydrologique : l'abondance

des précipitations, leur type, leur fréquence ainsi que leur répartition géographique et saisonnière, les taux d'évaporation et d'évapotranspiration, la survenue et la vitesse de la fonte des neiges. L'évaluation des capacités actuelle et future des modèles pour prédire les conditions climatiques futures et les composantes du cycle hydrologique est un enjeu fondamental pour prédire le devenir des ressources en eaux souterraines (Rivera *et al.*, 2004). Dans son rapport de 2007, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements climatiques (GIEC ou IPCC) écrivait « *En Amérique du Nord, le changement climatique va restreindre les ressources en eau déjà surexploitées et donc augmenter la concurrence entre les utilisateurs - agriculture, industrie, municipalités et secteur de l'environnement (degré de confiance très élevé)* » et rapportait plus d'une douzaine de changements déjà observés au siècle derniers qui illustraient « *le large éventail d'effets du réchauffement climatique sur les ressources en eau* ». Trois facteurs influenceront probablement la disponibilité en eaux souterraines selon le GIEC :

- i) les prélèvements qui reflètent le développement, la demande et la disponibilité d'autres sources;
- ii) l'évapotranspiration qui augmente avec la température;
- iii) l'alimentation, ou la recharge, déterminée par la température, la répartition dans le temps et le volume des précipitations, ainsi que les interactions avec les eaux de surface.

Il est largement établi qu'une hausse de la température de l'air induit une plus forte évapotranspiration et que l'infiltration des précipitations, étant dépendante du type d'événement pluvieux (durée, intensité et fréquence), une réduction de la recharge des aquifères serait probable dans le contexte des changements climatiques. Quels que soient les scénarios utilisés, les résultats des exercices de prédiction du GIEC indiquent tous un changement dans les niveaux **piézométriques** (qui dépendent de la température, des précipitations et du pompage) et les débits de base annuels simulés des eaux souterraines. Les résultats de Rivard *et al.* (2003) qui traitent spécifiquement des impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines de l'Est du Canada sont cependant plus nuancés. En se basant sur des séries chronologiques de niveaux d'eau dans des puits, de températures, de précipitations et de débits de rivières au Québec, au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard, ces auteurs ont montré que la recharge annuelle des différents aquifères étudiés semble rester stable ou diminuer depuis les dernières décennies alors que les précipitations et les températures tendent à augmenter depuis le début du siècle. Ils concluaient que les aquifères sont des systèmes sensibles et susceptibles de subir des baisses de niveaux piézométriques sous des conditions de recharge réduite.

#### 1.4.4.2 Changement de la capacité de réserve des aquifères côtiers

Associée aux changements climatiques, une augmentation globale du niveau moyen des océans de 0,18 à 0,59 m au cours du prochain siècle (IPCC, 2007) met encore plus en péril les aquifères côtiers et insulaires. L'élévation du niveau marin peut entraîner non seulement l'inondation, mais aussi l'érosion de la côte qui mènent à une perte de territoire et donc à une diminution de la capacité de réserve des réservoirs souterrains et du volume d'eau douce disponible dans l'aquifère (Oude Essink, 2001; figure 1.5).

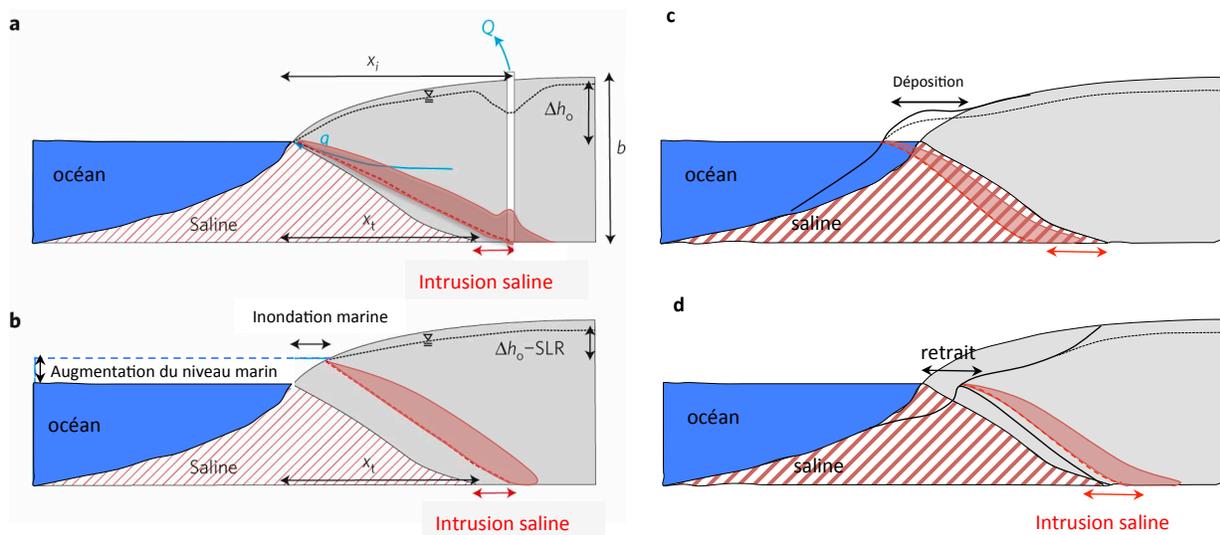


Figure 1.5. Vue schématique de l'impact d'une élévation du niveau de la mer et d'une modification du trait de côte sur l'étendue d'un réservoir aquifère (modifiée de Ferguson & Gleeson, 2012). Modèle conceptuel utilisé pour simuler l'impact de l'extraction d'eau souterraine (a), l'élévation du niveau marin (b) incluant l'intrusion saline et l'inondation ou transgression marine (c) l'accumulation de sédiments, et (d) l'érosion. Les variables simulées dans l'étude de Ferguson & Gleeson (2012) comprennent la décharge par mètre linéaire de côte ( $q$ ), le taux d'extraction d'eau souterraine ( $Q$ ), l'épaisseur de l'aquifère ( $b$ ), la différence de force hydraulique entre le système insulaire et la côte avant l'élévation du niveau marin ( $\Delta h_o$ ), la distance entre la côte et le puits ( $x_i$ ) et la distance basale au biseau salin ( $x_t$ ). La zone grisée montre la distribution de l'eau douce dans l'aquifère avant modification, la zone rouge simule la zone de mélange avec les eaux saumâtres. Note : échelle verticale non respectée.

Une étude plus récente, menée par Ferguson & Gleeson (2012), nuance cependant cette vision. Après avoir examiné plus de 1 400 aquifères côtiers aux États-Unis, les auteurs arrivent à la conclusion que les formations aquifères des États-Unis s'avèrent bien plus sensibles, à court terme, à l'activité humaine (pompage excessif, consommation, usage domestique ou irrigation) qu'à l'effet des changements climatiques qui s'effectue à plus long terme. Aujourd'hui, les réserves naturelles d'eau douce des aquifères côtiers ne semblent pas affectées par la hausse du

niveau de la mer et l'effet d'un rehaussement du niveau des océans semble peu significatif dans la région d'étude par rapport aux pressions de pompage.

Le **niveau marin relatif** (NMR) varie cependant selon les régions et dépend d'une combinaison de processus qui inclut l'augmentation à long terme du niveau marin depuis le dernier maximum glaciaire, la subsidence régionale et finalement, les changements climatiques qui tendent à accélérer l'augmentation du NMR. Mis à part la Côte-Nord du Saint-Laurent au Québec et les côtes du Labrador, la côte Est du Canada est globalement en **subsidence** (Figure 1.6). La subsidence est un affaissement localisé et lent de la croûte continentale suite au retrait des glaciers continentaux et du **relèvement isostatique** plus important au centre du continent. Le taux de subsidence dans les Provinces atlantiques est de l'ordre de 20 cm/siècle, mais atteint 30 cm/siècle à la pointe de la Gaspésie et aux Îles-de-la-Madeleine (Figure 1.7).

Près de 7 000 km de côte au Canada sont considérés comme fortement sensibles à la future hausse du niveau marin. Le gouvernement du Canada appréhende d'ailleurs des problèmes de remontée de la limite de l'eau salée dans la région du Golfe du Saint-Laurent et de salinisation des aquifères dans les Provinces atlantiques (Cohen *et al.*, 2001). Dans ces régions sensibles, l'augmentation du NMR, la subsidence et les changements climatiques pourraient mener à une suite d'impacts biophysiques et socio-économiques d'importance, qu'il est aujourd'hui nécessaire de considérer et d'inclure dans les plans de gestion des milieux côtiers (Figure 1.8). Selon Lemmen & Warren (2004), les changements climatiques devraient désormais être inclus dans les plans de gestion de l'eau des régions vulnérables. Pour intégrer non seulement les changements hydrologiques, mais aussi les incertitudes des changements climatiques, ces auteurs encouragent les décideurs à considérer ces risques et à évaluer la vulnérabilité des systèmes côtiers dans leur ensemble.

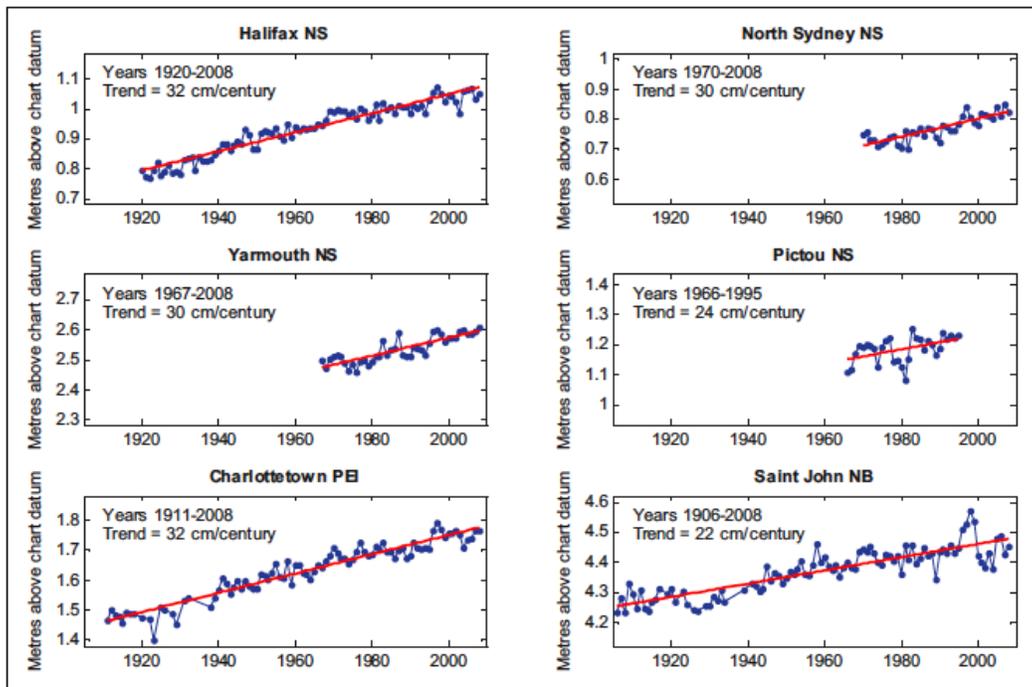


Figure 1.6. Niveaux marins moyens dans six ports de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick et de l'Île-du-Prince-Édouard (Province of Nova Scotia, 2009).

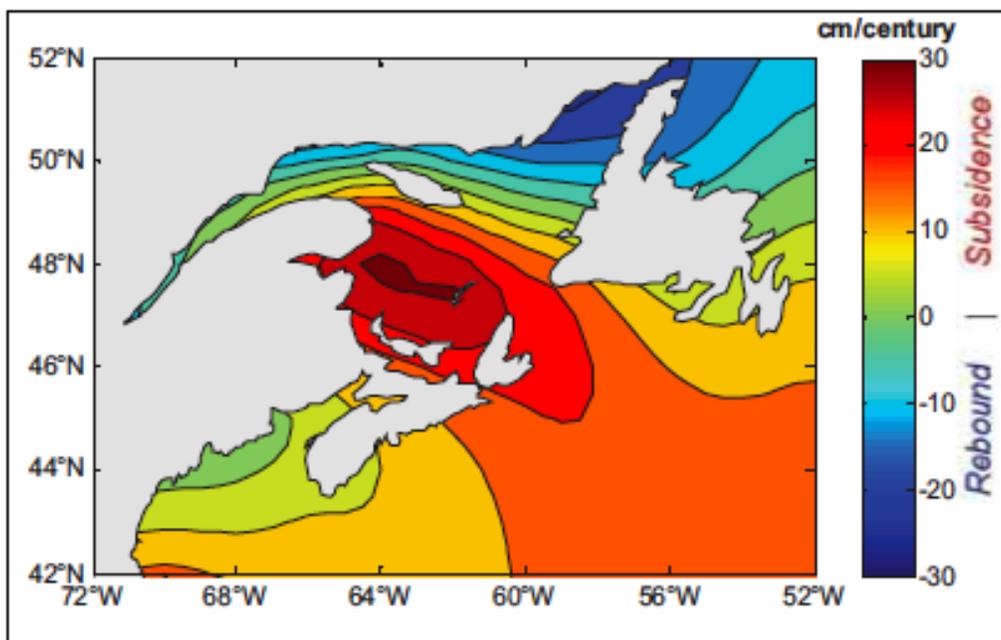


Figure 1.7. Taux régional d'augmentation du niveau marin relatif dû à l'ajustement isostatique estimé par le modèle Ice-5G (Peltier et al., 2004; Province of Nova Scotia, 2009).

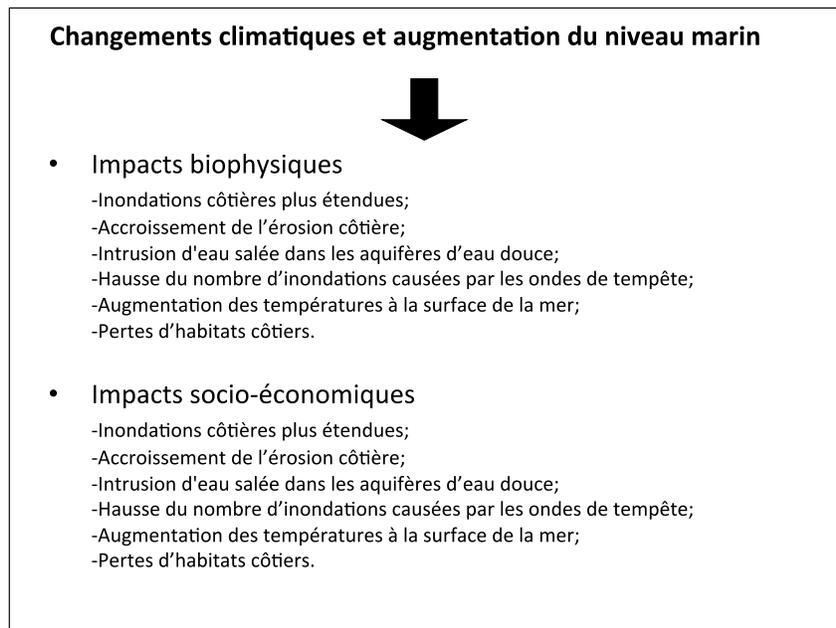


Figure 1.8. Impacts biophysiques et socio-économiques potentiels des changements climatiques en zone côtière (modifié de Lemmens & Warren, 2004).

#### 1.4.5 Décharges des aquifères : un impact local, des répercussions globales

L'altération des aquifères côtiers, due à une remontée d'eau salée ou à toute autre contamination, est un problème pour la consommation humaine, mais aussi un problème écologique. De nombreux écosystèmes sont directement ou indirectement tributaires de la qualité des eaux souterraines et de leur décharge dans les écosystèmes (Danielopol *et al.*, 2003). Ces décharges se manifestent principalement sous forme de suintements sous la surface de l'océan ou sous forme de sources (Figure 1.9).

Alors que le statut de sources ou de puits de carbone des océans et des zones côtières est largement discuté aujourd'hui (Chen *et al.*, 2003; Cai, 2011), ces systèmes de résurgences, difficilement accessibles, sont rarement intégrés dans les bilans globaux. Or, selon certaines études, ils constitueraient une voie d'échange chimique majeure entre le continent et l'océan

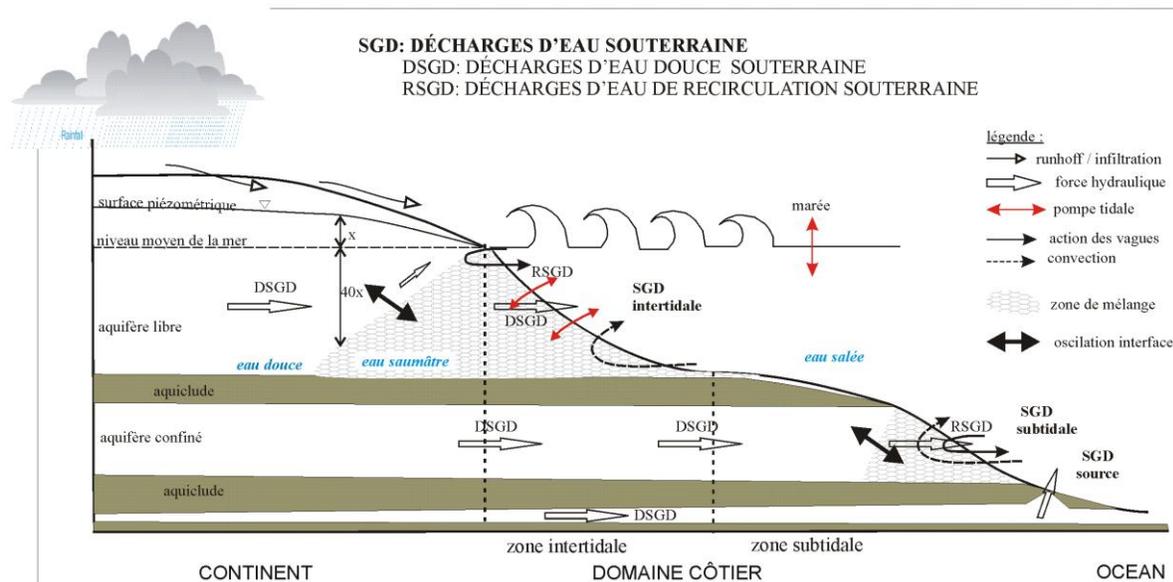


Figure 1.9. Vue schématique des relations entre aquifères côtiers confinés et libres, le milieu marin, et les différents types de décharges (décharges sous forme de suintements en zone tidale et subtidale, ou de sources profondes) à l'interface continent-océan. Les différentes forces qui gouvernent les flux ont été représentées par des flèches indiquant le sens des flux générés. La position du zéro de salinité à la limite de la zone de mélange est prédite selon le principe de Ghyben-Herzberg. Les échelles ne sont pas respectées (modifiée de Burnett et al., 2001).

côtier (Boudreau *et al.*, 2001; Huettel & Rusch, 2000; Huettel *et al.*, 1996; Krest *et al.*, 2000; Moore, 1996; Shaw *et al.*, 1998) et influenceraient directement la santé des écosystèmes littoraux (eutrophisation, prolifération algale) (Paerl, 1997; Valiela *et al.*, 1990). Les changements des régimes hydrologiques, l'érosion continentale et l'augmentation du niveau de la mer auront des conséquences sur les écosystèmes côtiers encore difficiles à évaluer (Groen *et al.*, 2000; Kooi *et al.*, 2000). **L'analyse de la vulnérabilité de ces systèmes face aux pressions anthropiques et aux changements climatiques sert de point de départ pour trouver des moyens efficaces de promouvoir des mesures susceptibles de limiter les impacts** (Oude Essink, 2001).

#### 1.4.6 La gestion des aquifères côtiers : un enjeu mondial

La gestion durable des ressources en eau des aquifères côtiers est aujourd'hui un enjeu mondial tel qu'en témoignent les nombreux articles et livres sur le sujet (Das & Datta, 1999; Cheng & Ouazar, 2004; Custodio, 2005; Oude Essink, 2001; Bocanegra *et al.*, 2010; Bear *et al.*, 1999; Bear, 2004; Post, 2005) ainsi que l'implication de grands organismes internationaux dans ces

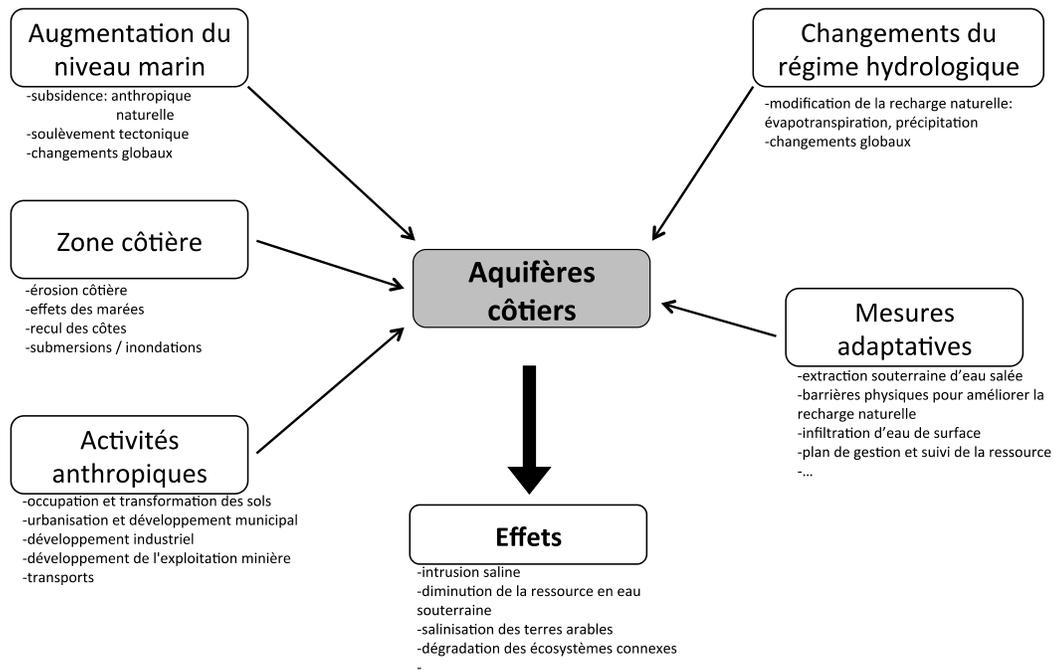


Figure 1.10. Résumé non exhaustif des variables et des contraintes qui affectent les aquifères côtiers (modifiée d'Oude Essink, 2001).

thématiques (UNESCO, AIEA). Toutes les études s'accordent à dire que la gestion des aquifères côtiers 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'origines naturelle ou anthropique. Sur cette base de compréhension entre potentiel et vulnérabilité, les politiques de gestion durable doivent être menées en considérant les variables externes qui forcent le système (forçages externes) et les contraintes internes (forçages internes) qui affectent la ressource (Oude Essink, 2001; Cheng & Ouazar, 2004). La figure 1.10 résume les différentes variables et contraintes qui affectent les systèmes côtiers.

Cette prise en compte est essentielle pour maximiser l'exploitation de la ressource, maintenir la qualité et celle du milieu, et permettre le développement économique, agricole et humain (Bear, 2004). L'aléa climatique échappant à tout contrôle, la gestion durable des aquifères côtiers nécessite la maîtrise des facteurs socio-économiques. Tels que reportés par Comte (2008), ceux-ci intègrent :

i) l'optimisation des prélèvements (répartition spatiale et débit);

- ii) la diversification des prélèvements (captage d'eaux saumâtres pour utilisation à des fins industrielles, agricoles, ou touristiques, désalinisation, *etc.*);
- iii) l'aménagement du territoire (maîtrise des risques de pollution à partir de la surface, réduction de l'évapotranspiration, *etc.*);
- iv) la mise en œuvre de technique de remédiation (restructuration des prélèvements, *etc.*) ou de limitation (déploiement d'infrastructures spécifiques, *etc.*).

Différentes actions politiques peuvent aussi être mises en place pour faciliter une gestion durable et pérenne des aquifères côtiers. Il s'agit, selon Custodio (2005) et tel que reporté par Comte (2008) :

- i) d'acquérir une bonne connaissance et compréhension du fonctionnement de l'aquifère;
- ii) de mettre en place un système de suivi adéquat et un système d'alerte précoce;
- iii) d'encourager la population et les autorités à vouloir une utilisation durable de la ressource;
- iv) de mettre en place une institution de gestion de l'eau possédant les outils et les ressources adéquats pour réaliser le travail;
- v) d'avoir une participation des organisations, de organismes gouvernementaux et des citoyens;
- vi) de développer l'enseignement, la formation et la diffusion des connaissances et des données.

Une saine gestion des eaux souterraines est une démarche cruciale à l'international, et particulièrement dans les pays du Sud et les pays en développement (Bocanegra *et al.*, 2010). La situation au Canada est aussi préoccupante. Selon le rapport d'Environnement Canada sur les Menaces pour l'approvisionnement en eau au Canada (Environnement Canada, 2004), « *Il est indiscutable que les réserves d'eau douce du Canada représentent une ressource nationale très précieuse. Selon des estimations récentes, la contribution mesurable de l'eau à l'économie canadienne s'établirait entre 7,5 et 23 milliards de dollars par année, ce qui est comparable aux chiffres bruts de la production agricole et d'autres secteurs économiques importants [...]* ». Ce rapport est très pertinent pour ceux qui s'intéressent et qui désirent comprendre les enjeux et défis que nous devons relever dès aujourd'hui, collectivement et individuellement, pour garantir aux Canadiens un accès à une eau de qualité à un prix raisonnable, tout en préservant notre milieu naturel. Les auteurs du rapport attirent notamment l'attention sur la nécessité d'une mise en œuvre systématique et continue des politiques et stratégies établies qui visent à protéger et à conserver les ressources en eau. De même, ils soulignent l'importance de renforcer et d'élargir les programmes de surveillance afin d'observer et d'évaluer les profils et les tendances relativement

à la demande et à la consommation d'eau, ainsi que les paramètres applicables en matière d'environnement et d'écosystèmes (O'Neil, 2004).

**FAITS SAILLANTS****Le projet**

- ➔ La gestion durable des ressources en eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine est un enjeu majeur pour le développement économique, touristique et humain;
- ➔ Cette synthèse a pour but de 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 :
  - 1) situe les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine dans un contexte global;
  - 2) dresse un portrait géographique, climatique et hydrogéologique de l'archipel madelinot;
  - 3) dresse un portrait des activités d'exploration et d'exploitation, même potentielles, qui pourraient altérer les aquifères côtiers des Îles-de-la-Madeleine.
  - 4) propose des pistes de réflexion pour une gestion durable de la ressource en eau souterraine aux Îles-de-la-Madeleine.

**Un enjeu mondial**

- ➔ Les aquifères côtiers et insulaires sont vulnérables aux pressions anthropiques qui se développent dans les milieux côtiers et aux pressions naturelles qui résultent de la variabilité et des changements climatiques;
- ➔ Les intrusions salines et la salinisation sont les plus importantes formes de contamination des aquifères côtiers et insulaires;
- ➔ Les aquifères côtiers et insulaires sont aussi sensibles aux pollutions diffuses qui s'exercent en surface ainsi qu'à celles qui s'exercent directement en profondeur;
- ➔ Les changements climatiques vont altérer les aquifères côtiers et insulaires en modifiant les cycles hydrogéologiques, mais aussi la capacité de réserve de ces systèmes;
- ➔ L'altération des aquifères côtiers et insulaires est un problème pour la consommation d'eau douce, mais aussi un problème écologique, car de nombreux écosystèmes de surface en sont dépendants;
- ➔ La gestion durable des eaux douces des aquifères insulaires est un enjeu majeur et 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'origines naturelle ou anthropique.

## 1.5 RÉFÉRENCES

- ABQ. (1999). *Gestion de l'eau au Québec*. Mémoire présenté au BAPE lors de la Commission sur la Gestion de l'eau, Audiences de la région de Montréal, novembre-décembre 1999, Association des Biologistes du Québec, 23 p.
- Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (2002) Guide technique quand les toxiques se jettent à l'eau...112 p.
- Arcand, P., Arsenault, C., Francoeur, N., Fournier, J., Guay, S., Jomphe, Y., Pilon, J.-M. & Samson, C. (2002). *Les eaux embouteillées*. Chaire Philippe-Pariseault de formation en mondialisation des marchés de l'agro-alimentaire. <http://www.unites.uqam.ca/cpp/docu-f/rapport/eau/2eau.pdf>.
- Baumgartner, A. & Reichel, E. (1975). *The World Water Balance*. Elsevier, New York, 179 p.
- Barbecot, F., Marlin, C., Gibert, E., Dever, L. (1997). Geochemical evolution of a coastal aquifer to a Holocene seawater intrusion (Dogger aquifer, northern France). In: IAEA (Eds.), Proceedings of an international symposium on isotope techniques in the study of environmental changes, IAEA-SM-349/15, 275-282. IAEA, Vienna.
- Barlow, P.M. (2003). Ground Water in Freshwater – Saltwater Environments of the Atlantic Coast. *US Geological Survey*, 1262: 1-113.
- Barlow, P.M. & Reichard, E.G. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*, 18: 247-260.
- Bear, J. (2004). Management of a Coastal Aquifer. *Ground Water*, 42: 317.
- Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Herrera, I. & Ouazar, D. (eds.). (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers: concept, methods and practices*. Kluwer Academic Publishers, London, 625 p.
- Bocanegra, E., Da Silva Jr., G.C., Custodio, E., Manzano, M. & Montenegro, S. (2010). State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeology Journal*, 18: 261-267.
- Boudreau, B.P., Huettel, M., Foster, S., Jahnke, R.A., McLachlan, A. & Middelburg, J.J. (2001). Permeable marine sediments: overturning an old paradigm. *OES*, 82: 133-136.
- Burnett, W.C., Taniguchi, M. & Oberdorfer, J.A. (2001). Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *Journal of Sea Research*, 46(2): 109-116.
- Buteau, S. & Bourgault, M.-H. (2010). Détermination de concentrations seuils de trihalométhanes dans l'eau potable lors de dépassements trimestriels de la norme. Direction de la santé environnementale et de la toxicologie. Institut national de la santé publique, Québec, 123 p.
- Cai, W.-J. (2011). Estuarine and Coastal Ocean Carbon Paradox: CO<sub>2</sub> Sinks or Sites of Terrestrial Carbon Incineration? *Annual Review of Marine Science*, 3(1) : 123-145.
- Cardona, A., Carrillo-Rivera, J.J., Huizar-Alvarez, R. & Graniel-Castro E. (2004). Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology*, 45: 350–366.
- Castany G. (1998). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris, 236 p.

- Chen, C.T.A., Liu, K.K. & Macdonald, R. (2003). Continental margin exchanges. In Fasham, M.J.R. (éd.): *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*, pp. 53-98. Springer-Verlag, Berlin, pp. 53-98.
- Cheng, A.H.D. & Ouazar, D. (eds.). (2004). *Coastal aquifer management: monitoring, modeling & case studies*. Lewis Publishers, 280 p.
- Cohen, S., K. Miller, K. Duncan, E. Gregorich, P. Groffman, P. Kovacs, V. Magaña, D. McKnight, E. Mills, and D. Schimel. (2001). North America. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by James J. McCarthy, Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken, and Kasey S. White. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 343-379.
- Code de la santé publique. 2007. Arrêté du 11 janvier (2007) relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la santé publique.
- 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.
- Custodio, E. (2005). Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In Bocanegra E.M., Hernández M.A. & Usunoff, E. (eds.): *Groundwater and human development*. Taylor & Francis, London, UK, pp. 15–38.
- Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A. & Notenboom, J. (2003). Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation*, 30: 104-130.
- Darnault, C.J.G. & Godinez, I.G. (2008). Coastal aquifers and salt intrusion. In Darnault C.J.G. (éd.): *Overexploitation and Contamination of Shared Groundwater resources*. Springer, Netherlands, pp. 185-210.
- Das, A., & Datta, B. (1999). Development of multiobjective management models for coastal aquifers. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(2): 76–87.
- De Montety, V., Radakovitch, O., Vallet-Coulomb, C., Blavoux, B., Hermitte, D. & Valles, V. (2008). Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes. In *Confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta southern France*, *Applied Geochemistry*, 23: 2337-2349.
- Environnement Canada. (2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport no. 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, no. 1, 148 p.
- Environnement Canada. (2007). Utilisation de l'eau par les municipalités : statistiques de 2004. Rapport de 2007 sur l'utilisation municipale de l'eau.
- Environnement Canada. (2009). Le site web de l'eau douce. [http://www.ec.gc.ca/WATER/f\\_main.html](http://www.ec.gc.ca/WATER/f_main.html).
- Environnement Canada (visité: 2012) Utilisation de l'eau souterraine. in *Les eaux souterraines*. <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=300688DC-1>.
- EPA. National Primary Drinking Water Regulations; Disinfectants and Disinfection By-products; Final Rule. Federal register 1998;1-88.

- Ferguson, G. & Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 1413: 1758-1798.
- Gilliand, P. (1971). Étude hydrogéologique par sondage électrique des Îles-de-la-Madeleine. Géoterrex Ltée, Étude 85-158.
- Groen, J., Velstra, J. & Meesters, A.G.C.A. (2000). Salinization processes in paleowaters in coastal sediments of Suriname: evidence from  $[\delta]^{37}\text{Cl}$  analysis and diffusion modelling. *Journal of Hydrology*, 234(1-2): 1-20.
- Hiroshiro, Y., Jinno, K., & Berndtsson R. (2006). Hydrogeochemical properties of a salinity-affected coastal aquifer in western Japan. *Hydrological Processes*, 20: 1425-1435.
- Hopple, J., Barringer, J.L. & Koleis, J. (2007). Water quality constituents, dissolved-organic-carbon fractions, and disinfection by-product formation in water from community water supply wells. In Scientific Investigations Report. 1998-1999. *U.S. Geological Survey*. No. 2006-5660, pp.54.
- Huettel, M., Ziebis, W. & Forster, S. (1996). Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments. *Limnology and Oceanography*, 412: 309-322.
- Huettel, M. & Rusch, A. 2000. Transport and degradation of phytoplankton in permeable sediment. *Limnology and Oceanography*, 453: 534-549.
- IPCC. 2007. Climate Changes (2007): Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working group II to the fourth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P. van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.
- Kampioti, A. & Stephanou, E. (2002). The impact of bromide on the formation of neutral and acidic disinfection byproducts (DBPs) in Mediterranean chlorinated drinking water. *Water Resources*, 36: 2596-2606.
- Krest, J., Moore, W., Gardner, L. & Morris, J. (2000). Marsh nutrient export supplied by groundwater discharge: Evidence from radium measurements. *Global Biogeochemical cycles*, 141: 167-176.
- Kooi, H., Groen, J. & Leijnse, A. (2000). Modes of seawater intrusion during transgressions. *Water Resources Research*, 36: 3581-3589.
- Lemmen, D.S. & Warren, F.J. (2004). *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Gouvernement du Canada, Ottawa, 174 p.
- Lemière B., Seguin J.J., Le Guen C., Guyonnet D., Baranger Ph. Darmendrail D., Conil P. (2001). Guide de comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662-FR, 103 p.
- Madelin'Eau. (2004). Gestion des eaux souterraines aux Îles de la Madeleine - Un défi de développement durable. Rapport présenté à la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine dans le cadre du FQADD et du FCM-FHVM, Décembre 2004, Groupe Madelin'Eau, 100 p.
- Ministère de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2004). Bilan de la qualité de l'eau au Québec, 46 p.
- Moore, W.S. (1996). Large groundwater inputs to coastal waters revealed by  $^{226}\text{Ra}$  enrichments. *Nature*, 380: 575-612.

- O'Neil D. (2004). Menaces pour l'approvisionnement en eau au Canada – Perspective dans Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport no. 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, no. 1, 148 p.
- Oude Essink, G.H.P. (2001). Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in the Netherlands: A Numerical Study. *Transport in porous media*, 43:137-148.
- Paerl, H.W. (1997). Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources. *Limnology and Oceanography*, 42: 1154-1165.
- Paniconi, C., Khlaifi, I., Lecca, G., Giacomelli, A. & Tarhouni, J. (2001). Modeling and Analysis of Seawater Intrusion. In The Coastal Aquifer of Eastern Cap-Bon, Tunisia *Transport in Porous Media*, 43: 3-28.
- Park, S.H., Yun, T.H., Chae, G.T., Yoo, I.S., Shin, K.S., Heo, C.H. & Lee, S.K. (2005). Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea. *Journal of Hydrology*, 313: 182-194.
- Peltier, W. R.(2004). Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G VM2 Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 111-149.
- Petalas, C. & Lambrakis, N. (2006). Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers – the case of the coastal aquifers of Thrace. *Journal of Hydrology*, 324: 51-64.
- Post, V.E.A. (2004). Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 138 p.
- Post, V.E.A. (2005). Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead? *Hydrogeology Journal*, 13: 120–123.
- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). (2003). *Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management*. Early Warning and Assessment Report Series, RS 03-3, Nairobi, Kenya.
- Province of Nova Scotia (2009) The 2009 State of Nova Scotia's Coast Summary Report. ISBN: 978-1-55457-328-8. 21 p.
- Ramade, F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ediscience internationale, Paris, 1075 p.
- Ressources naturelles Canada (visité: 2012) Qu'est-ce que l'eau souterraine? in L'eau souterraine: une ressource vitale mais vulnérable. <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/produits-services/produits-cartographie/geoscape/hydropanorama/ile-bowen/6507>
- Richter, B.C. & Kreitler, C.W. (1993). Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization. CRC Press, Boca Raton, Florida, 265 p.
- Rivard, C., Marion, J., Michaud, Y., Benhammane, S., Morin, A., Lefebvre R. & Rivera, A. (2003). Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, Commission géologique du Canada, dossier public 1577. 39 p. et annexes

- Rivera, A., Allen, D.M. & Maathius, H.(2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique - Variabilités climatiques – eau souterraines. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport no. 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, no. 1, 148 p.
- Santé Canada. (2006). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – Les trihalométhanes.
- Santé Canada. (2012). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Tableau sommaire. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario.
- Secrétariat du comité du ministère du conseil exécutif. (1997). *Symposium sur la gestion de l'eau*. Gouvernement du Québec, 59 p.
- Smith, B.S. (1994). Saltwater movement in the upper Floridan aquifer beneath Port Royal Sound, SC. *U.S. Geological Survey Water-Supply*, Paper 2421, 40 p.
- Smith, B.S. (1988). Ground water flow and salt water encroachment in the upper Floridan aquifer, Beaufort and Jasper Counties, SC. *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations*, Report 87-4285, 61 p.
- Shaw, T.J., Moore, W.S., Kloepfer, J. & Sochaski, M.A. (1998). The flux of barium to the coastal waters of the southeastern USA: the importance of submarine groundwater discharge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(18): 3047.
- Snyder, M., Taillefert, M. & Ruppel, C. (2004). Redox zonation at the saline-influenced boundaries of a permeable surficial aquifer: effects of physical forcing on the biogeochemical cycling of iron and manganese. *Journal of hydrology*, 296: 164-178.
- UNESCO. (1991). Hydrology and water resources of small islands, a practical guide. Studies and reports on hydrology No. 49. Prepared by Falkland, A. (ed.) and Custodio, E., with contributions from Diaz-Arenas, A. & Simler, L. and case studies submitted by others. UNESCO, Paris, 435 p.
- Valiela, I., Costa, J., Foreman, K., Teal, J.M., Howes, B. & Aubrey, D. (1990). Transport of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters. *Biogeochemistry*, 103: 177-198.
- White, I. & Falkland, T. (2010). Management of freshwater lenses on small Pacific islands. *Hydrogeology Journal*, 18: 227-246.