

# **Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine**

## **Un défi de développement durable**

### **Rapport final**

#### **Document No 1**

#### **Méthodologie de l'étude**

présenté à :

**Municipalité des Îles-de-la-Madeleine**

par :

**Groupe Madelin'Eau**

AGÉOS : Denis Richard, Brossard, Québec

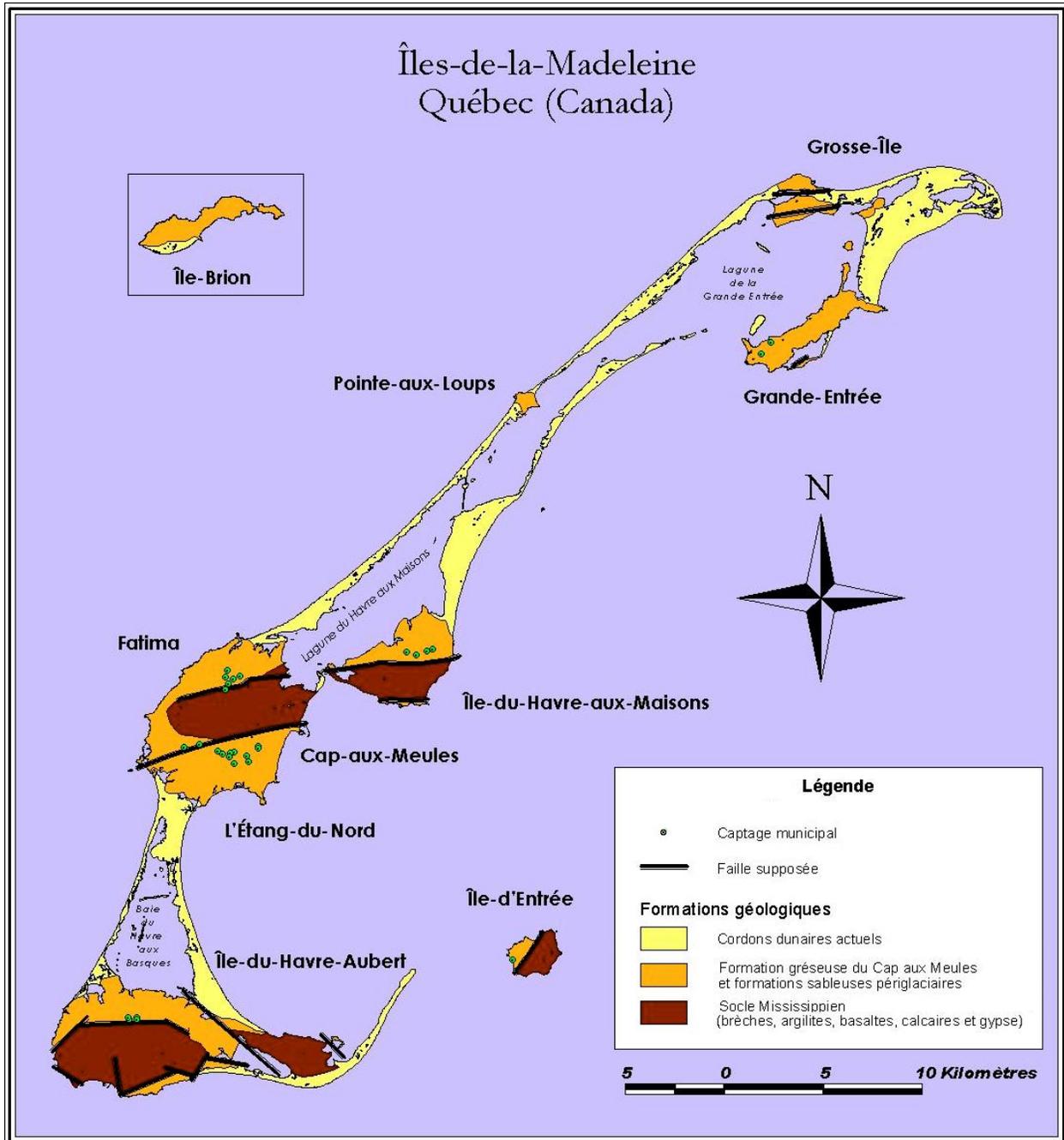
Envir'Eau Puits : Renald McCormack, Saint-Nicolas, Québec

HYDRIAD : Olivier Banton et Jean-Christophe Comte, Québec, Québec

Dans le cadre d'un financement provenant du :

**Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD)**  
**Conseil Régional de Concertation et de Développement - Gaspésie - Les Îles**  
**Fonds d'Habilitation Municipal Vert (FCM-FHMV)**

Version révisée et complétée – Décembre 2004



## AVANT-PROPOS

Ce rapport final conclut l'ensemble des activités réalisées au cours des années 2002 - 2004 dans le cadre du projet

### **Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine : Un défi de développement durable**

subventionné par le Fonds d'action québécois pour le développement durable (dossier 388), la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, le Conseil Régional de Concertation et de Développement – Gaspésie – Les Îles, le Fonds d'Habilitation Municipal Vert (Dossier EF 2951) et l'organisme Attention Frag'Îles.

Le territoire concerné par l'étude couvre tous les îlots habités de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Ce rapport final se présente, pour fins de commodité, sous la forme de trois documents faisant respectivement état : (1) de la méthodologie de travail utilisée dans cette étude, (2) des activités et résultats concernant l'Île de Cap-aux-Meules et (3) des activités et résultats concernant les autres îles habitées de l'archipel.

Les membres du Groupe Madelin'Eau sont :

- q AGÉOS : Denis Richard (Brossard, Québec, Canada)
- q Envir'Eau Puits : Renald McCormack (Saint-Nicolas, Québec, Canada)
- q HYDRIAD : Olivier Banton et Jean-Christophe Comte (Québec, Québec, Canada)

Outre les membres du Groupe Madelin'Eau, les intervenants ayant participé à la réalisation de ce projet sont :

- q Jean-François Moreau, hydrogéologue stagiaire, Tommy Poirier, Véronique Poirier, Rosaire-Gilles Arseneault et Julien Turbide, stagiaires et ressortissants des Îles-de-la-Madeleine,
- q les représentants municipaux : Jeannot Gagnon, Directeur du développement du milieu et de l'aménagement du territoire, Jean Richard, Directeur des Travaux Publics, Jean Hubert, Directeur adjoint à l'hygiène du milieu et Benoît Boudreau, géomaticien.

Groupe Madelin'Eau  
8265, rue Rimbaud,  
Brossard, Québec, Canada, J4X 1T4  
tél. (450) 923-4357

*Les avis et commentaires exprimés dans ce rapport ne reflètent pas nécessairement  
les opinions des organismes commanditaires ou subventionnaires*

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte de l'étude 2002-2004</b> .....	<b>5</b>
1.1	Quelques définitions et vocabulaires clés .....	5
1.2	Aspects réglementaires .....	9
1.3	Travaux et études antérieurs .....	14
<b>2</b>	<b>Programmation des activités du projet (2002-2004)</b> .....	<b>20</b>
2.1	Calendrier des activités .....	20
2.2	Essais de pompage sur les puits municipaux .....	24
<b>3</b>	<b>Investigations géophysiques</b> .....	<b>28</b>
3.1	Mise en œuvre des profils géophysiques.....	28
3.2	Caractérisation géophysique des structures hydrogéologiques .....	29
3.3	Détermination des vitesses d'écoulement par géophysique.....	32
<b>4</b>	<b>Cartographie des activités à risque</b> .....	<b>34</b>
4.1	Détermination des périmètres d'intervention (ParaPol).....	34
4.2	Inventaire des sources potentielles de contamination.....	37
<b>5</b>	<b>Campagne d'échantillonnage des eaux souterraines</b> .....	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>Modélisation des écoulements souterrains (MODFLOW)</b> .....	<b>41</b>
6.1	Calibration des conductivités hydrauliques (régime permanent) .....	41
6.2	Calibration des coefficients d'emménagement (régime transitoire) .....	44
6.3	Calibration des porosités cinématiques (vitesses d'écoulement) .....	46
6.4	Application à la détermination des périmètres de protection .....	48
<b>7</b>	<b>Modélisation des biseaux salés et des intrusions salines (SUTRA)</b> .....	<b>49</b>
7.1	Principe de simulation des écoulements densitaires.....	49
7.2	Conséquence d'une augmentation des débits actuels.....	50
<b>8</b>	<b>Conclusions et recommandations générales</b> .....	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>58</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Impacts d'un pompage sur la nappe.....	10
Figure 2 : Méthodologie de l'étude et articulation des différent outils utilisés.....	23
Figure 3 : Dispositif de mesure Wenner (permettant la caractérisation des sous-blocs).....	29
Figure 4 : Localisation des profils géophysiques réalisés.....	30
Figure 5 : Quelques sections géophysiques types.....	31
Figure 6 : Vitesse de dérive des remontées salines.....	33
Figure 7 : Vitesse de dérive des traces de sels déglaçants.....	33
Figure 8 : Exemples de périmètres d'intervention déterminés avec ParaPol.....	36
Figure 9 : Conductivités hydrauliques calibrées par modélisation.....	42
Figure 10 : Comparaison des piézométries simulées et observées en régime permanent.....	43
Figure 11 : Comparaison des transmissivités calibrées et mesurées.....	44
Figure 12 : Recharges mensuelles de l'année 1980 selon Leblanc (1994).....	45
Figure 13 : Prélèvements mensuels des captages municipaux en 2003.....	45
Figure 14 : Comparaison des niveaux mensuels simulés et mesurés.....	47
Figure 15 : Lignes d'écoulement et marqueurs 200 et 550 jours (Havre-aux-Maisons).....	48
Figure 16 : Équilibre entre eau douce et eau salée selon Ghyben-Herzberg.....	49
Figure 17 : Secteurs modélisés avec SUTRA.....	51
Figure 18 : Modélisation des intrusions salines pour Etang-du-Nord – Cap-aux-Meules.....	52
Figure 19 : Modélisation des intrusions salines pour Fatima.....	53
Figure 20 : Modélisation des intrusions salines pour l'Île-du-Havre-Aubert.....	54
Figure 21 : Modélisation des intrusions salines pour l'Île de Havre-aux-Maisons.....	55

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Poids des paramètres impliqués dans le calcul DRASTIC (général).....	11
Tableau 2 : Stratigraphie du Permo-Carbonifère des Îles-de-la-Madeleine.....	15
Tableau 3 : Description lithostratigraphique des Membres et Formations du Tableau 2.....	15
Tableau 4 : Paramètres hydrogéologiques selon Sylvestre (1979).....	17
Tableau 5 : Essais de pompage réalisés sur les captages municipaux.....	25
Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques moyens obtenus des essais de pompage.....	27
Tableau 7 : Dimension des périmètres d'intervention calculés avec ParaPol.....	35
Tableau 8 : Vitesses d'écoulement et porosités cinématiques obtenues par géophysique.....	46

## 1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE 2002-2004

Dans le cadre du projet de développement durable en matière de gestion des eaux souterraines aux Îles de la Madeleine, les objectifs du Groupe Madelin'Eau étaient de doter les représentants de la municipalité des Îles-de-la-Madeleine d'outils de gestion et d'intervention leur permettant de planifier et de valoriser les ressources en eau souterraine. Au terme du projet (avril 2002 – décembre 2004), les principaux résultats obtenus et fournis à la municipalité sont :

- q en terme réglementaire, les aires d'alimentation et les périmètres de protection autour des captages municipaux existants tels que définis par le Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES, adopté en juin 2002) et
- q en terme technique, les modalités de pompage et la disponibilité supplémentaire de la ressource, permettant ainsi une Gestion/Exploitation/Protection des ressources en eau souterraine de l'archipel.

L'atteinte des objectifs mentionnés ci-dessus s'est appuyée sur une vision consolidée des systèmes aquifères captés par les captages municipaux existants. Au cours du projet, des travaux de terrain ont impliqué :

- q un inventaire des puits privés,
- q un essai de pompage sur chacun des captages municipaux,
- q des levés géophysiques sur toutes les îles de l'archipel, qu'elles soient desservies ou non par des réseaux d'aqueduc,
- q des prélèvements d'eau souterraine pour fins d'analyse sur les îles non desservies par un réseau d'aqueduc.

L'analyse et l'interprétation des données recueillies par le Groupe Madelin'Eau ont :

- q mis à jour la description hydrogéologique aux échelles locale et régionale des systèmes aquifères captés,
- q réalisé la modélisation :
  - ü des écoulements des eaux souterraines pour les trois îles documentées et desservies par un réseau d'aqueduc, ainsi que pour l'île de La Grande-Entrée;
  - ü du biseau salé pour les principaux champs captants.

Le présent rapport final présente l'ensemble des travaux réalisés et des résultats obtenus. Plus spécifiquement, ce document (Document No 1) présente, d'une part, les considérations méthodologiques liées à l'action du Groupe Madelin'Eau sur le terrain et, d'autre part, les éléments conceptuels à retenir pour une gestion appropriée des ressources en eau souterraine disponibles dans l'archipel des Îles-de-la-Madeleine.

### 1.1 QUELQUES DÉFINITIONS ET VOCABULAIRES CLÉS

Avant de développer et de présenter la méthodologie appliquée dans le cadre de ce projet pour obtenir les résultats nécessaires à l'établissement des périmètres de protection et des recommandations sur la gestion et la protection des ressources en eau, il est nécessaire de faire un bref rappel de la définition de quelques termes techniques utilisés dans ce document. En effet, il est apparu au travers de la littérature documentaire concernant les Îles-de-la-

Madeleine, qu'un certain nombre de termes, peu ou non définis par les différents auteurs, avaient parfois une signification ou un sens différents d'un auteur à l'autre. Afin d'éviter tout malentendu quant à l'utilisation des termes utilisés dans ce rapport, nous en donnons ici de brèves définitions.

### 1.1.1 Notions de débit de pompage

Les prélèvements par les captages municipaux ont une forte influence sur la disponibilité de la ressource et sur le comportement de l'interface eau douce / eau salée. Il est donc de première importance de préciser les différentes terminologies utilisées concernant les débits de prélèvement :

- q *Débit sécuritaire* (Bilodeau – LEQ, 1993) : c'est le débit maximal de prélèvement du puits à appliquer pour que le rabattement produit s'équilibre, d'après Ghyben-Herzberg, avec une profondeur de l'interface eau douce/eau salée d'au moins 30 mètres sous l'extrémité inférieure du puits ;
- q *Débit optimal* (Leblanc, 1994) : c'est le débit sécuritaire défini par Bilodeau - LEQ adapté à la situation hydrogéologique d'une anisotropie verticale de 1/10, et d'une remontée saline de 0,3 fois la distance initiale entre la base du puits et l'interface saline (remontée critique) ;
- q *Débit critique* (Isabel, 1994) : c'est le débit à ne pas dépasser pour ne pas pomper d'eau salée ; il est calculé à partir d'une formule empirique adaptée des modèles de Schmorak et Mercado (1969), en fonction de la distance entre la base du puits et l'interface, la conductivité hydraulique et les densités de l'eau douce et de l'eau salée ;
- q *Débit nominal de la pompe* : c'est le débit théoriquement prélevable par la pompe, directement lié à ses caractéristiques techniques ; il ne tient donc pas compte des pertes de charge dans le tubage ;
- q *Débit de balancement dans le réseau* : c'est le débit instantané effectivement envoyé dans le réseau à la sortie du puits en fonctionnement ;
- q *Débit de prélèvement moyen effectif* : c'est le débit moyen du puits, pour une période considérée, tenant compte du fait que les puits ne fonctionnent pas en continu; il s'agit en fait du débit de balancement dans le réseau multiplié par la fraction du temps de pompage effectif ; c'est le débit utilisé dans nos modélisations, calculé sur une base mensuelle pour le régime transitoire et annuelle pour le régime permanent.

### 1.1.2 Principaux termes hydrogéologiques

- q *Aquifère* : caractérise un matériel contenant de l'eau et pouvant facilement la libérer sous l'effet d'un pompage ; un matériel aquifère est donc nécessairement poreux et perméable ; un aquifère est une couche ou une strate de matériel ayant ces propriétés ;
- q *Nappe d'eau (nappe aquifère, nappe phréatique)* : une nappe d'eau signifie, selon les auteurs, soit la surface de l'eau souterraine, soit toute la couche d'eau souterraine ; on

confond parfois de façon abusive nappe et aquifère (on parle par exemple du pompage de l'eau de la nappe) ; le terme « nappe aquifère » serait donc également abusif ; une *nappe phréatique* est une nappe peu profonde, dont l'eau se situe donc relativement proche de la surface du sol ; une *nappe libre* qualifie une nappe dont la surface peut librement fluctuer en fonction de la recharge par la pluie, de l'écoulement naturel et du pompage ; par opposition, une *nappe captive* (ou nappe confinée par anglicisme) est une nappe dont la surface est contrainte par une couche imperméable sus-jacente (par exemple de l'argile) ; sa surface ne peut donc fluctuer librement et seule sa pression varie en fonction de l'écoulement et du pompage (aucune infiltration de la pluie ne peut non plus recharger cette nappe) ;

- q *Charge hydraulique et piézométrie* : la charge hydraulique ou piézométrie représente la hauteur (en altitude par rapport à la mer) du niveau de l'eau observable et mesurable dans un puits ; dans le cas d'une nappe libre, la charge hydraulique représente la hauteur de la surface de la nappe ; dans le cas d'une nappe captive, elle représente la pression de l'eau dans l'aquifère, exprimée en hauteur d'eau d'équilibre (un peu comme comment quand on parle de mm de mercure dans le cas de la pression barométrique) ;
- q *Gradient hydraulique ou piézométrique* : de façon schématique, le gradient hydraulique représente la pente de la nappe ; ainsi, plus le gradient est élevé, plus la nappe s'écoule rapidement ;
- q *Conductivité hydraulique* : c'est le paramètre représentant l'aptitude ou la facilité du matériel aquifère à laisser s'écouler l'eau ; elle est également appelée « *perméabilité* », ce dernier paramètre référant de façon rigoureuse au même processus mais indépendamment du fluide s'écoulant (gaz ou liquide) ;
- q *Transmissivité* : c'est le paramètre directement caractérisé par un essai de pompage ; il représente physiquement le produit (la multiplication) de la conductivité hydraulique par l'épaisseur de la tranche d'eau ;

### 1.1.3 Terminologie particulière des porosités et paramètres associés

Nous précisons ci-après quelques termes reliés à la porosité d'une roche (matériel aquifère), qui permettront par ailleurs de mieux comprendre plusieurs des discussions ayant lieu dans ce rapport au niveau des sections traitant des essais de pompage, de l'interprétation de la géophysique et de la modélisation mathématique.

Précisons pour commencer qu'une roche peut être poreuse tout en étant imperméable, comme c'est le cas pour une argile qui contient 40 % d'eau mais ne la laisse pas s'écouler. Il ne faut donc pas confondre porosité et perméabilité.

- q *Porosité totale* : c'est l'importance relative (en volume) des vides qui peuvent être occupés par l'eau ; une porosité de 10% indique donc que la roche peut contenir 10% d'eau ; dans le cas des roches consolidés (comme les grès), on peut différencier une porosité matricielle et une porosité fissurale, la première étant reliée aux vides entre les grains constituant la roche, la seconde représentant les vides engendrés par les fissures de cette roche ; dans le cas des grès rouges de l'archipel,

chacune de ces porosités peut représenter une valeur de l'ordre de 5 à 15% ; la porosité de fissure, qui résulte d'ouvertures plus importantes de la roche, semble cependant contribuer de façon plus importante à l'écoulement de l'eau ;

- q *Porosité efficace ou coefficient d'emmagasinement des nappes libres* : elle représente la quantité d'eau qui est libérée par l'aquifère lorsque l'on abaisse la surface de la nappe d'un mètre ; c'est une valeur nécessairement plus faible que la porosité totale ; de plus, l'anisotropie du matériau et la stratification des couches peuvent fortement diminuer la valeur de cette porosité efficace par rapport à celle de la porosité totale ; ceci explique en partie les faibles valeurs d'emmagasinement obtenues lors des essais de pompage, de l'ordre de 0.01 à 1 % ;
- q *Porosité cinématique* : cette grandeur représente la seule partie de l'eau présente dans la porosité qui s'écoule naturellement (écoulement de la nappe) ; elle est pour les grès rouges de l'ordre de 1 à 3 % selon les données de la géophysique ;

#### 1.1.4 Termes de géologie et de géophysique

- q *Lithostratigraphie* : description séquentielle géologique des strates de roches ;
- q *Horst et graben* : lorsqu'un système géologique est affecté par un réseau de fractures majeures, certains des compartiments ainsi individualisés peuvent s'affaisser par rapport aux autres et former des grabens ; le terme « horst » dénomme les compartiments qui ne sont pas affaissés et constituent alors généralement les hauteurs du paysage géologique ;
- q *Diapir* : dôme de sels présent dans le sous-sol et résultant de la compression des matériaux géologiques ; la mise en place des diapirs bouleverse souvent la structure des autres matériaux de façon importante ;
- q *Conductivité électrique et résistivité électrique* : la conductivité électrique est la propriété représentant l'aptitude ou la facilité d'un corps à conduire l'électricité ; la résistivité électrique est son inverse ;
- q *Tomographie de résistivité électrique ou panneau électrique* : technique de prospection géophysique permettant de réaliser une coupe verticale 2D, représentant les propriétés électriques des composants du sous-sol ; dans notre cas, le profil ou panneau ainsi réalisé couvre une section quasi rectangulaire d'environ 60 m de profondeur sur une longueur aussi grande que désirée ;
- q *Biseau salé* : interface d'équilibre entre l'eau douce de la nappe (1000 g/L) et l'eau salée de la mer (1035 g/L) ; cet interface présente une pente (biseau) induite par l'écoulement de l'eau douce vers la mer ;

## 1.2 ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

### 1.2.1 Périmètres de protection

Dans le contexte réglementaire actuel du Québec, les dimensions des périmètres de protection bactériologique et virologique sont calculées de façon spécifique à partir des paramètres hydrogéologiques du système aquifère pour le cas d'un milieu aquifère non consolidé ou consolidé affecté d'une porosité primaire et secondaire. Les dimensions retenues, peu importe le type de milieu aquifère, s'appuie sur le calcul des isochrones 200 et 550 jours.

Le système aquifère des îles, tel que reconnu par les études antérieures, est un milieu consolidé fracturé se caractérisant par des porosités primaire et secondaire très marquées. Ainsi, pour chacun des puits municipaux, les périmètres de protection sont déterminés dans l'aire d'alimentation à partir du calcul des isochrones 200 et 550 jours. Pour le calcul de ces isochrones, la porosité cinématique est un paramètre primordial, mais généralement peu, voire pas, renseigné par la littérature. Ce paramètre peut être caractérisé sur le terrain à partir d'essais de traçage difficiles à mettre en œuvre. Par contre, la délimitation de l'aire d'alimentation ne requiert pas la connaissance de cette porosité cinématique.

Les dimensions de l'aire d'alimentation tiennent compte du débit d'exploitation et des propriétés hydrogéologiques spécifiques du système aquifère. Ces dimensions sont déterminées, selon le guide du MENV, à l'aide de la formule de Todd (1980) ou à l'aide d'une modélisation mathématique plus précise et plus complexe. L'aire d'alimentation est ouverte vers l'amont, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle de l'écoulement régional.

Lorsqu'un puits est pompé, il génère un cône de dépression des eaux induisant :

- q une aire d'influence : zone à l'intérieur de laquelle les niveaux d'eau sont influencés par le pompage ou la recharge d'un puits (ellipse de la figure 1),
- q une aire d'alimentation : zone à l'intérieur de laquelle l'eau souterraine s'écoule en direction du puits de pompage (zone grisée de la figure 1); la limite la plus amont de cette aire d'alimentation est la ligne de partage des eaux ou bien la zone de recharge.

Les dimensions de l'aire d'alimentation sont donc étendues en amont du puits et limitées en aval. À l'intérieur de cette aire, l'eau s'écoule vers le puits et sera tôt ou tard captée par celui-ci. Cette aire se définit géographiquement par des dimensions dont les formules et définitions sont:

A (m) : point de stagnation (limite aval de l'aire d'alimentation) =  $Q / (2 * \pi * T * i)$

L (m) : largeur de l'aire d'alimentation en amont =  $Q / (T * i)$

B (m) : largeur de l'aire d'alimentation au niveau du puits =  $L / 2$

où T est la transmissivité ( $m^2/s$ ); i est le gradient hydraulique régional (sans unité); Q est le débit de pompage ( $m^3/s$ ).

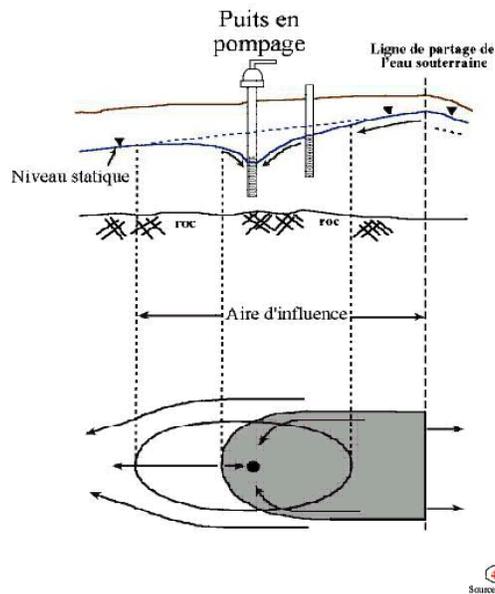


Figure 1 : Impacts d'un pompage sur la nappe

### 1.2.2 Évaluation de la vulnérabilité (DRASTIC)

Le 3<sup>e</sup> paragraphe de l'article 25 du Règlement sur le captage des eaux souterraines oblige « l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les aires définies au paragraphe 2<sup>e</sup> (soit les aires de protection bactériologique (200 jours) et virologique (550 jours)) par l'application de la méthode DRASTIC ; »

De plus, le 2<sup>e</sup> alinéa de l'article 26 interdit « l'épandage de déjections animales, de compost de ferme ou de matières résiduelles fertilisantes, sauf les matières résiduelles fertilisantes conformes à la norme CAN/BNQ 0413-200 , CAN/BNQ 0413-400 ou NQ 0419-090 dans l'aire de protection bactériologique d'un lieu de captage d'eau souterraine lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire. »

Quant au 3<sup>e</sup> alinéa, il interdit « l'épandage de boues provenant d'ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées ou de tout autre système de traitement ou d'accumulation d'eaux usées sanitaires, ou de matières contenant de telles boues dans l'aire de protection virologique d'un lieu de captage d'eau souterraine lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est égal ou supérieur à 100 sur une portion quelconque de cette aire. Cette interdiction d'épandage n'est toutefois pas applicable aux boues ou matières en contenant qui sont certifiées conformes à la norme CAN/BNQ 0413-200 ou CAN/BNQ 0413-400 ».

DRASTIC est une méthode de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines communément utilisée en Amérique du Nord et consistant en un système de cotation

numérique (Aller, 1987, US-EPA/600-2-87-035). Elle repose sur trois hypothèses de base avec lesquelles l'utilisateur doit être familier afin de bien cerner ses limites d'application :

- q les sources potentielles de contamination se trouvent à la surface du sol ;
- q les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le biais de l'infiltration ;
- q la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans le calcul de l'indice.

Les sept lettres de l'acronyme DRASTIC représentent les paramètres permettant de calculer l'indice de vulnérabilité :

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

Ces sept paramètres représentent, de façon schématique, l'hydrodynamique des écoulements en ses principales composantes, lesquelles influencent à différents degrés les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol et le sous-sol. La valeur réelle de chaque paramètre (par exemple la pente exprimée en %) est alors traduite en une cote, variant de 1 à 10, définie par des intervalles de valeurs réelles. La plus petite cote représentant les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination. L'attribution de ces cotes doit être faite par un hydrogéologue expérimenté et familier du terrain. Une solide expérience du terrain est le meilleur moyen de réduire l'appréciation subjective de certains paramètres.

Un poids, compris entre 1 et 5, reflète par ailleurs le degré d'influence de chacun des paramètres. Le poids de ces paramètres a été fixé par un groupe d'experts américains selon la méthode consensuelle DELPHI. Le tableau 1 précise le poids (l'importance) de chacun des paramètres impliqués dans le calcul de l'indice DRASTIC.

<b>PÂRAMÈTRE</b>	<b>POIDS</b>
Profondeur de la nappe d'eau	5
Recharge efficace	4
Milieu aquifère	3
Type de sol	2
Pente du terrain	1
Impact de la zone vadose	5
Conductivité hydraulique	3

**Tableau 1 : Poids des paramètres impliqués dans le calcul DRASTIC (général)**

L'indice de vulnérabilité DRASTIC (ID) est finalement déterminé par la somme pondérée des différentes cotes obtenues ( $p$  = poids ;  $c$  = cote).

### 1.2.3 Contexte réglementaire spécifique aux Îles-de-la-Madeleine

Aux Îles-de-la-Madeleine, le Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES) oblige la municipalité à gérer tout projet de captage d'eau souterraine, même s'ils ne sont pas destinés à alimenter un réseau d'aqueduc municipal. Ainsi, en vertu de l'article 40 de ce règlement, l'aménagement d'un ouvrage de captage d'eau souterraine sur l'archipel est soumis à l'autorisation du ministre.

**40.** Tout projet d'exploitation d'eaux souterraines sur le territoire des Îles-de-la-Madeleine est subordonné à l'autorisation du ministre.

Lorsqu'il s'agit de projets qui ne sont pas visés par l'article 31, la demande d'autorisation doit être présentée par écrit, contenir les renseignements et être accompagnée des documents mentionnés à l'article 32.

Les projets qui ne sont pas visés par l'autorisation du ministre en vertu de l'article 31 sont les projets de captage dont le débit d'exploitation est inférieur à 75 m<sup>3</sup>/jour et alimentant moins de 20 personnes. Plus spécifiquement, les autorisations du ministre s'appliquent aux projets décrits ci-après :

**31.** Sont subordonnés à l'autorisation du ministre :

1° les projets de captage d'eau souterraine d'une capacité moindre que 75 m<sup>3</sup> par jour destinée à alimenter plus de 20 personnes ;

2° les projets de captage d'eau souterraine destinée à être distribuée ou vendue comme eau de source ou eau minérale ou à être un ingrédient de fabrication, de conservation ou de traitement annoncé comme eau de source ou eau minérale sur un produit au sens de l'article 1 de la Loi sur les produits alimentaires (L.R.Q., c. P-29) ou sur l'emballage, le récipient ou l'étiquette d'un tel produit ;

3° les projets de captage d'eau souterraine d'une capacité de 75 m<sup>3</sup> ou plus par jour ou qui porteront la capacité à plus de 75 m<sup>3</sup> par jour.

Les projets de captage visés au présent article sont soustraits de l'application de l'article 32 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

Les dispositions du présent article entreront en vigueur le 15 juin 2003 sauf en ce qui concerne leur application aux territoires visés à l'article 41 pour lesquels elles entreront en vigueur le 15 juin 2002. (D. 696-2002, a. 65)

Les renseignements demandés dans le cadre d'une demande d'autorisation apparaissent dans l'article 32 décrit ci-après :

**32.** Toute demande d'autorisation pour la réalisation d'un projet visé à l'article 31 doit être présentée par écrit, contenir les renseignements et documents suivants :

1° s'il s'agit d'une personne physique, ses nom, adresse et numéro de téléphone ;

2° s'il s'agit d'une personne morale, d'une société ou d'une association, son nom, l'adresse de son siège, la qualité du signataire de la demande ainsi qu'une copie certifiée de l'acte autorisant la demande et son signataire ;

3° le numéro matricule attribué au demandeur lorsqu'il est immatriculé au registre des entreprises individuelles, des sociétés et des personnes morales ;

4° s'il s'agit d'une municipalité, une copie certifiée de l'acte autorisant la demande et son signataire ;

5° la désignation cadastrale des lots sur lesquels sera réalisé le projet ;

6° l'utilisation qui sera faite de l'eau prélevée ;

7° le débit total d'eau souterraine qui devrait être prélevée à chaque mois d'une année ;

8° les titres de propriété et les usages des terres situées dans un rayon de 30 m du lieu où sera aménagé tout ouvrage de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine ;

9° une attestation délivrée par le ministre des Ressources naturelles relative aux droits miniers susceptibles d'y être octroyés ;

10° s'il s'agit d'un projet de captage d'eau souterraine situé sur les terres du domaine de l'État, une lettre du ministre des Ressources naturelles indiquant son intention de convenir d'un bail avec l'auteur de la demande relativement à l'installation d'infrastructures reliées à des activités de captage d'eau souterraine.

## 1.3 TRAVAUX ET ETUDES ANTERIEURS

### 1.3.1 Connaissances géologiques existantes

Dans son contexte régional, les Îles-de-la-Madeleine appartiennent à la province géologique des Appalaches et, plus spécifiquement, au bassin Carbonifère des Maritimes. Les îles-de-la-Madeleine, qui occupent une position centrale par rapport aux limites de ce bassin sédimentaire, se localisent dans le rift, appelé Bassin de Fundy (Poole, 1967) ou épi-eugéosynclinal de Fundy (Kelly, 1980, Hacquebard, 1971).

Des sédiments terrigènes continentaux constituent l'essentiel des matériaux de remplissage du bassin. Ils appartiennent à des faciès fluviatiles, lacustres, palustres et éoliens accumulés sous des conditions morphoclimatiques variables. L'incursion marine du Viséen a abandonné différents dépôts : en majorité des mudstones, siltstones et grès néritiques (Howie et Barss, 1975) accompagnés de carbonates et d'évaporites.

Les roches ignées, extrusives et intrusives, ne contribuent que pour un volume limité aux roches du bassin. À l'exception des Îles-de-la-Madeleine où les laves constituent une séquence relativement épaisse (au moins 150 mètres), les roches volcaniques appartiennent à des épanchements restreints, disséminés dans le bassin.

#### 1.3.1.1 Socle rocheux

Selon Brisebois (1981), les roches observables en surface sont regroupées en deux assemblages principaux (voir tableau 2) :

- q le Groupe de Windsor d'âge Carbonifère (Viséen), regroupant les formations :
  - ü du Havre-aux-Maisons et
  - ü du Cap-du-Diable, et
- q la Formation du Cap-aux-Meules, d'âge Permien inférieur, reposant en discordance sur le Groupe de Windsor.

Le tableau 3 précise la lithostratigraphie par assemblage géologique (Membres et Formations) tel que défini par Brisebois (1981). Les cartes géologiques sont présentées par îles dans les documents 2 et 3 du rapport final. Selon cet auteur, la puissance de ces formations et membres serait comme suit :

- q Formation du Havre-aux-Maisons : plusieurs centaines de mètres,
- q Formation du Cap-au-Diable : approximativement de 150 mètres mais absentes de la partie nord des îles aussi bien en surface qu'en forages,
- q Formation du Cap-aux-Meules :
  - ü Membre de l'Étang-du-Nord : indéterminée par Brisebois (1981),
  - ü Membre de l'Étang-des-Caps : environ 370 mètres

Près des failles majeures délimitant les horsts et grabens, l'angle d'inclinaison des strates de la formation du Cap-aux-Meules peut atteindre 90 degrés. En s'éloignant des failles, les couches de la formation du Cap-aux-Meules deviennent sub-horizontales.

Âge		Millions d'années	Unités stratigraphiques	
Permien inférieur		245	Formation du Cap-aux-Meules	Membre de l'Étang-des-Caps
		286		Membre de l'Étang-du-Nord
Carbonifère	Pennsylvanien	Stéphanien	Aucun sédiment (discordance)	
		Westphalien		
	Mississippien	Namurien	Groupe de Windsor	Formation du Cap-au-Diable
		Viséen		Formation du Havre-aux-Maisons
				Aucun sédiment (discordance)
	Tournaisien	352		
		360		

**Tableau 2 : Stratigraphie du Permo-Carbonifère des Îles-de-la-Madeleine**

Assemblage	Description lithostratigraphique
Membre de l'Étang-des-Caps :	Grès (quartzitiques) et silstones à laminations obliques géantes
Membre de l'Étang-du-Nord :	Grès, silstones, mudstones, conglomérats et calcaires
Formation du Cap-au-Diable :	Basaltes, roches pyroclastiques, calcaire cristallin
Formation du Havre-aux-Maisons :	Brèches d'effondrement, mudstones, silstones, grès, calcaires, dolomies, gypse, anhydrite, basaltes, roches volcanoclastiques

**Tableau 3 : Description lithostratigraphique des Membres et Formations du Tableau 2**

### 1.3.1.2 Dépôts meubles

Selon Sylvestre (1979), les dépôts du quaternaire renferment presque exclusivement des sables provenant de l'érosion des grès rouges de la formation de Cap-aux-Meules et accumulés en tombolos (dunes) qui relient entre elles les îles. On note la présence de quelques vallées profondes (atteignant plus de 60 mètres de profondeur) enfouies sous des sédiments tantôt sablonneux, tantôt silteux et souvent argileux. La plus longue se trouve sur l'île de La Grande-Entrée et comprend des matériaux peu perméables, ne présentant aucun intérêt hydrogéologique (Sylvestre, 1979).

Les informations géologiques cartographiées par Brisebois (1981) ont été digitalisées et les données ont été remises à la Municipalité pour intégration dans leur SIG et corrélation avec les données hydrogéologiques. Une carte isohypse de l'épaisseur des dépôts meubles a été générée par le logiciel SURFER et les résultats par île ont été transmis à la Municipalité sous forme de fichier \*.dxf pour insertion à leur SIG.

### 1.3.1.3 Géologie structurale

Brisebois (1981) a relevé lors de ses travaux cartographiques plusieurs caractéristiques structurales dont :

- q des failles subverticales séparant de façon marquée les horsts (qui s'ouvrent sur la mer),
- q les horsts :
  - ü de Havre-Aubert;
  - ü du Cap-aux-Meules;
  - ü du Havre-aux-Maisons;
- q d'autres failles verticales dont celles :
  - ü de l'Île D'Entrée;
  - ü de l'île Boudreau (Grande-Entrée);
  - ü de Grosse-Île;
- q deux synclinaux :
  - ü à l'Île D'Entrée;
  - ü à l'anse à Damase (Havre-aux-Maisons);
- q un anticlinal :
  - ü à l'île Boudreau;
- q des diaclases, constituant un réseau de fractures sans orientation préférentielle.

Brisebois estime à 300 mètres l'amplitude des déplacements verticaux des failles encadrant les horsts alors que le mouvement vertical des diapirs de sels pourraient atteindre 4875 mètres (Howie et Barss, 1975). La présence de sel diapirique sous l'archipel des îles et les réajustements qui se sont produits à l'intérieur de ces masses salines fournissent un mécanisme moteur au mouvement des horsts.

### 1.3.2 Travaux hydrogéologiques antérieurs

Une revue de littérature a permis d'établir la chronologie des interventions hydrogéologiques et de brosser un portrait hydrogéologique préliminaire de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine. Les documents hydrogéologiques recensés portaient sur:

- q des études hydrogéologiques régionales (Dessureault et Simard, 1970, MRN (1972 et 1974), CIDEQ (1974, 1975), Poulin (1977), Sylvestre (1979), LEQ (1993) et Bilodeau (1993, 1995 et 1998),
- q des études hydrogéologiques ponctuelles notamment celles permettant de caractériser les environs des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'île d'Entrée,
- q des thèses de maîtrise (Sylvestre, 1974, et Leblanc, 1994),
- q une évaluation de la problématique liée à l'exploitation des eaux souterraines faite par Sylvestre et Boucher (1985).

Hormis les études hydrogéologiques axées sur une approche régionale ou locale (ravitaillement en eau potable des collectivités de Havre-aux-Maisons, Cap-aux-Meules et Havre-Aubert), il existe aussi un grand nombre de rapports techniques portant sur l'impact des déversements d'hydrocarbures ayant eu lieu à proximité des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'île d'Entrée.

L'annexe 13 du rapport Madelin'Eau, mars 2003, décrit pour chacune des études les travaux réalisés classés chronologiquement et par île, les résultats obtenus et interprétés, identifie les lacunes documentaires et présente les conclusions et les recommandations avancées par les auteurs. Par ailleurs, un méli-mélo extraordinaire existe dans ces rapports eu égard aux unités utilisées. Plusieurs de ces études sont décrites dans le système anglo-saxon, d'autres dans le système métrique. Dans ce rapport, la compilation des données est dans le système SI ; les débits sont généralement exprimés en L/s et les transmissivités en m<sup>2</sup>/sec, tout en conservant les valeurs et les unités d'origines permettant en tout temps de se valider.

L'exploitation de l'ensemble de la documentation a permis de regrouper les informations par :

- q captages municipaux associés à leurs piézomètres,
- q forages extraits du Système d'information hydrogéologique (SIH),
- q forages documentés en termes hydrogéologiques.

### 1.3.2.1 Géométrie du réservoir aquifère

La géométrie des réservoirs aquifères est étroitement associée à la lithostratigraphie des terrains décrite par Brisebois (1981). Sylvestre (1979) a exploité les résultats préliminaires de Brisebois et a consolidé le contexte géologique et hydrogéologique (voir tableau 4). Selon Sylvestre, le membre de l'Étang-des-Caps est l'unité géologique la plus perméable, donc, le meilleur aquifère. Quoique très vulnérable à la contamination par les eaux salées à cause de sa proximité de la mer, ces grès à lamination oblique géante demeurent à toutes fins pratiques la seule formation capable de fournir de forts débits. L'eau de cette formation est d'excellente qualité. Cependant, elle peut être légèrement dure près des contacts avec la formation de Havre-aux-Maisons et légèrement ferrugineuse au voisinage des vallées enfouies.

Selon Brisebois, 1981		Selon Sylvestre, 1979			
Assemblage	Description lithostratigraphique	Puissance	Transmissivité moyenne	Débit moyen	Risque de contamination (intrusion d'eau salée ou pollution de surface)
		mètres	m <sup>2</sup> /s * 10 <sup>4</sup>	L/s	
Dépôts meubles	Sable de plage (dune)	0 - 15 +	8,63 - 17,26	15,15	Très élevé
	Argile, sable, gravier	1 - 60 +	0,863	0,076	Élevé
Membre de l'Étang-des-Caps :	Grès (quartzitiques) et silstones à laminations obliques géantes	600 +	17,26 - 34,52	30,31	Très élevé
Membre de l'Étang-du-Nord :	Grès, silstones, mudstones, conglomérats et calcaires		0,863	0,076	Élevé ou modéré
Formation du Cap-au-Diable :	Basaltes, roches pyroclastiques, calcaire cristallin	15 - 60	1,5	0,4	Faible
Formation du Havre-aux-Maisons :	Brèches d'effondrement, mudstones, silstones, grès, calcaires, dolomies, gypse, anhydrite, basaltes, roches volcanoclastiques	150 +	0,01 - 0,1 (si absence de mudstone)	0,01 - 0,05	Faible
			0,01 - 0,9 (si présence de mudstone)	0,01 - 0,05	Faible

**Tableau 4 : Paramètres hydrogéologiques selon Sylvestre (1979)**

Le membre de l'Étang-des-Caps constitué de grès rouge et gris-vert à lamination oblique géante est le réservoir aquifère capté par les captages municipaux sur les îles-de-Havre-Aubert, de Cap-aux-Meules et de Havre-aux-Maisons. Sylvestre (1979) précise que le tiers de la surface totale des îles est recouvert par le membre de l'Étang-des-Caps, un réservoir aquifère de très bonne perméabilité, constituant la seule formation aquifère exploitable.

### **1.3.2 Considérations hydrogéologiques**

De l'examen des études hydrogéologiques disponibles, il ressort que :

- q le réservoir aquifère principal, voire unique, de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, est constitué par les grès de la Formation du Cap-aux-Meules en particulier le Membre de l'Étang-des-Caps et plus accessoirement par le Membre de l'Étang-du-Nord;
- q les grès de la Formation du Cap-aux-Meules qui renferment de l'eau douce, sont largement en contact avec le littoral, donc, avec une masse d'eau salée;
- q les coupes géologiques et techniques des divers forages ayant supportés les études mentionnées étant pratiquement toujours absentes, la géométrie du réservoir aquifère, notamment son épaisseur, est mal déterminée;
- q les quelques coupes géologiques dressées par Dessureault et Simard (1970) deviennent par défaut les coupes de références.

### **1.3.3 Travaux géophysiques antérieurs**

En 1971 et 1976, le Ministère des Richesses naturelles du Québec a confié à la compagnie géophysique Géoterrex (Ottawa), l'exécution d'un double levé géophysique aux Îles-de-la-Madeleine. Le levé de 1971 a couvert l'ensemble de l'archipel alors que celui réalisé en 1976 a couvert les seules îles desservies par un réseau d'aqueduc.

Les objectifs du levé effectué en 1971 étaient de :

- q localiser l'interface eau douce / eau salée en bordure de mer;
- q déterminer la position du plancher de la nappe d'eau douce ou celle du contact eau douce / eau salée à grande profondeur aux environs des puits de pompage et au centre des îles.

Les objectifs du levé effectué en 1976 étaient de :

- q mesurer l'influence des pompages sur la nappe d'eau douce en répétant des sondages électriques (S.E.) effectués en 1971;
- q obtenir quelques coupes électriques supplémentaires en levant quelques nouveaux profils de sondages électriques.

Le levé géophysique de 1971 a permis de déterminer :

- q la position du contact eau douce / eau salée sur un certain nombre de profils;
- q le plancher de la nappe d'eau douce à proximité des puits de pompage existant en 1971 (secteur du Cap-aux-Meules).

Par ailleurs, Geoterrex et le ministère admettaient que le plancher de la nappe d'eau douce était constitué par les roches du groupe de Windsor, notamment les horizons argileux superficiels.

Les conclusions du levé réalisé en 1971 étaient que :

- q le contact eau douce / eau salée s'enfonce rapidement avec l'éloignement du rivage jusqu'au point où celui-ci recoupe le toit du Windsor; cette intersection représente le point le plus bas de la nappe d'eau douce;
- q le front salin s'était déplacé vers l'intérieur des terres entre les localités de Cap-aux-Meules et de Lavernière;

- q là où les roches du groupe de Windsor sont à trop grande profondeur pour jouer le rôle de plancher imperméable, l'eau douce repose partout sur l'eau salée comme c'est le cas à l'île de Pointe-aux-Loups et à l'île de Grande-Entrée (Coffin).

Les recommandations de 1971 étaient de :

- q fixer les débits d'exploitation (sans préciser les modalités du pompage prévalant à cette époque) en vue de contrôler le mouvement du front salin;
- q installer deux puits équipés d'une sonde donnant les concentrations à différentes profondeurs.

Les conclusions du levé réalisé en 1976 ont mis en évidence une avancée des eaux salées dans les zones suivantes :

- q zone de Cap-aux-Meules-sud (profils DD' et FF');
- q zone de Cap-aux-Meules-nord (profil MM');
- q Île de Havre-aux-Maisons (extrémité orientale de SS').

## **2 PROGRAMMATION DES ACTIVITÉS DU PROJET (2002-2004)**

### **2.1 CALENDRIER DES ACTIVITÉS**

#### **2.1.1 Période 2002 – 2003**

Au cours de la première année, les actions du projet ont porté sur des :

- q activités de terrain;
- q activités scientifiques et professionnelles;
- q activités d'encadrement et de suivi.

Les activités de terrain comportaient :

- q un inventaire des puits existants (municipaux et privés);
- q la collecte des registres de pompage;
- q des relevés piézométriques par île.

Les activités scientifiques et professionnelles portaient sur :

- q la revue des données et études antérieures;
- q le dépouillement et l'interprétation des données antérieures;
- q l'exploitation des données hydrogéologiques;
- q la recherche d'un protocole d'échange des données cartographiques entre l'équipe du projet et les représentants municipaux.

Outre ces activités, les experts du Groupe Madelin'Eau ont effectué plusieurs séjours dans l'archipel pour encadrer notamment :

- q en avril 2002, le démarrage du projet en collaboration avec l'équipe municipale;
- q en mai 2002, la mise en route des travaux effectués par les stagiaires à l'été 2002;
- q en juin 2002, la supervision, la coordination et la planification des travaux des stagiaires;
- q en novembre 2002, l'inspection et la recherche des données relatives aux modalités de pompage des captages municipaux.

Au mois de janvier 2003, le Groupe Madelin'Eau a :

- q présenté le rapport d'étape no 1 aux représentants de la municipalité;
- q planifié les travaux de l'été 2003.

Les résultats acquis au cours de cette première année d'activités ont été consignés au Rapport d'étape no 1, mars 2003.

#### **2.1.2 Période 2003 – 2004**

Pour la période 2003 – 2004, les travaux du Groupe Madelin'Eau ont porté sur des :

- q activités de terrain;
- q activités scientifiques et professionnelles;

- q activités d'encadrement et de suivi.

Les activités de terrain comportaient :

- q des essais de pompage réalisés sur chacun des captages municipaux existants;
- q des levés géophysiques autour de tous les captages municipaux et sur les îles non desservies par un réseau d'aqueduc;
- q un inventaire des risques environnementaux dans les environs des captages municipaux;
- q une campagne d'échantillonnage d'eau souterraine sur les îles non desservies par un réseau d'aqueduc.

Les activités scientifiques et professionnelles portaient sur :

- q l'interprétation des essais de pompage;
- q l'interprétation des levés géophysiques;
- q l'application du logiciel ParaPol afin de déterminer des aires d'intervention autour des captages municipaux pour fins d'inventaire des activités à risques;
- q la détermination de la vulnérabilité dans les aires d'intervention délimitées par ParaPol;
- q le développement d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines (MODFLOW) pour les îles documentées (à l'aide des informations fournies par les ouvrages municipaux);
- q le développement d'un modèle de simulation du biseau salé (SUTRA) pour les principaux champs captants;
- q la rédaction du rapport final du projet.

Outre ces activités, les experts du Groupe Madelin'Eau ont effectué plusieurs séjours dans l'archipel pour encadrer notamment :

- q en avril 2003, le recrutement des stagiaires et le démarrage des essais de pompage en collaboration avec l'équipe municipale;
- q en mai 2003, la mise en œuvre des levés géophysiques et l'encadrement scientifique nécessaire aux interprétations des essais de pompage;
- q en juin et juillet 2003, la supervision, la coordination et la planification des travaux des stagiaires ainsi que l'ébauche d'un premier rapport hydrogéologique;
- q en juillet et août 2003, la supervision et la coordination des travaux des stagiaires et la définition d'un programme d'échantillonnage d'eau souterraine;
- q en août 2003, la revue scientifique des activités en cours et l'encadrement scientifique nécessaire aux interprétations des levés géophysiques.

Au mois de février 2004, le Groupe Madelin'Eau a présenté :

- q à l'équipe municipale les principaux constats techniques, scientifiques et hydrogéologiques résultant des actions du projet;
- q aux élus de la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, les principales conclusions et leurs conséquences sur la gestion des ressources en eau souterraine disponibles dans l'archipel;
- q aux partenaires environnementaux (dont Attention Frag'îles), les aspects environnementaux et socio-économiques reliés à ces ressources;
- q aux médias, les principaux constats du projet.

Au mois d'octobre 2004, le Groupe Madelin'Eau a effectué une nouvelle campagne de terrain visant à :

- q réaliser des levés géophysiques sur l'Île de La Grande-Entrée afin de préciser la géométrie des formations géologiques et des aquifères qui y sont reliés;
- q réaliser de nouveaux levés géophysiques, complémentaires à ceux réalisées durant l'été 2003, afin de préciser les vitesses d'écoulement par l'application d'une technique de traçage géophysique;
- q effectuer un essai de pompage sur le puits Grenier à la demande de la municipalité.

En novembre et décembre 2004, le Groupe Madelin'Eau a effectué :

- q des travaux de modélisation spécifiques à l'Île de La Grande-Entrée;
- q la rédaction d'un rapport spécifique à l'Île de La Grande-Entrée;
- q actualiser le rapport de mars 2004 concernant l'ensemble des îles de l'archipel.

### **2.1.3 Méthodologie d'approche et de réalisation de l'étude Madelin'Eau**

La figure 2 présente un schéma conceptuel de l'articulation des différents outils mis en œuvre aux Îles-de-la-Madeleine pour dresser le portrait hydrogéologique actualisé de l'archipel. Les outils ainsi mis en œuvre sont :

- q la banque de données cartographiques de la municipalité et la mise à jour des données géoréférencées (orthophotographies, géologie, pédologie, ouvrages de captage ou d'observation des eaux souterraines, réseaux d'aqueduc, aménagement du territoire, etc.),
- q les essais de pompage réalisés au printemps 2003;
- q le logiciel de délimitation des périmètres d'intervention ParaPol;
- q la méthode géophysique de tomographie de résistivité électrique (ERT);
- q le logiciel de modélisation des écoulements souterrains MODFLOW,
- q le logiciel de modélisation des intrusions salines SUTRA.

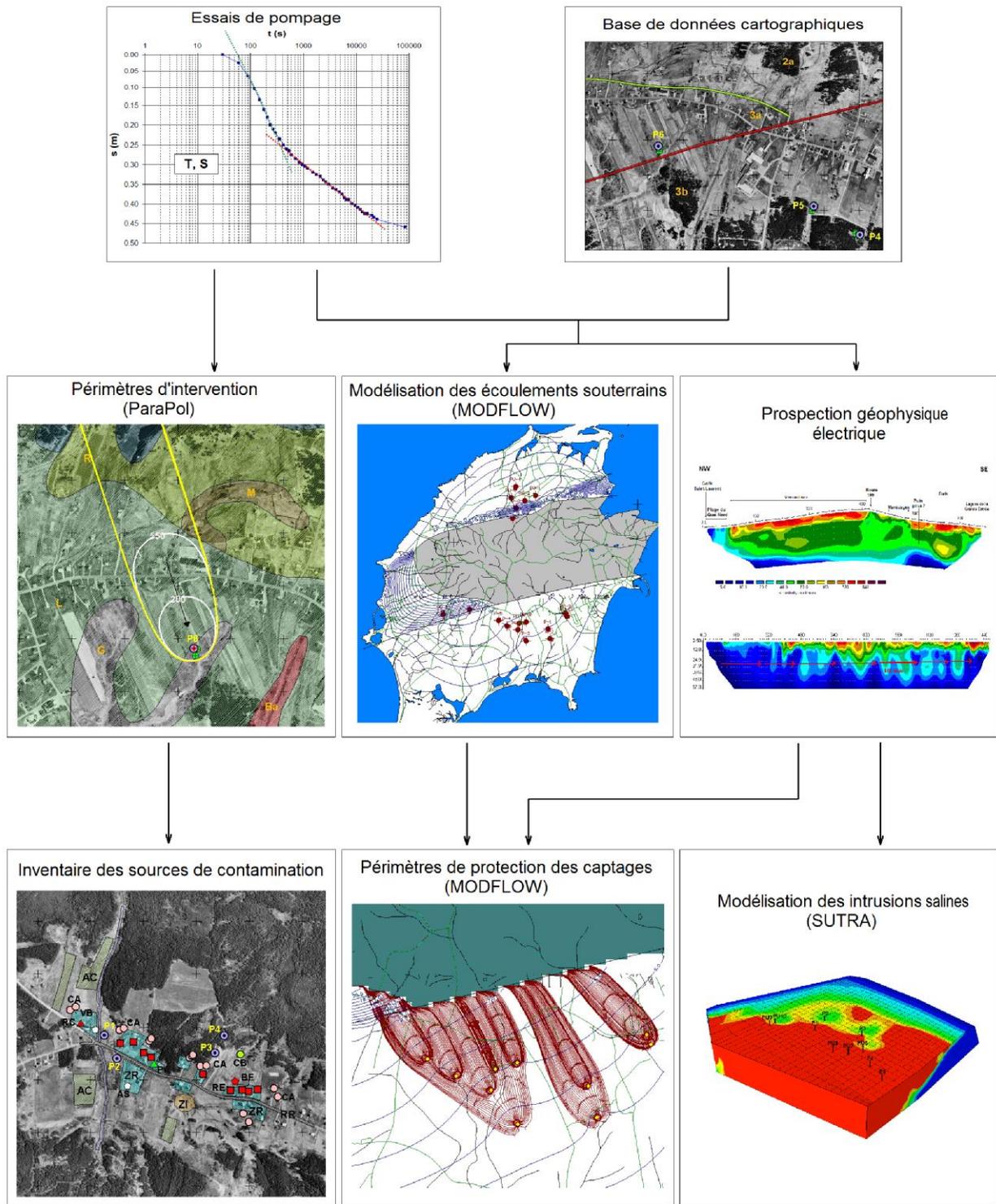


Figure 2 : Méthodologie de l'étude et articulation des différents outils utilisés

## 2.2 ESSAIS DE POMPAGE SUR LES PUIITS MUNICIPAUX

L'alimentation en eau potable de l'archipel des îles-de-la-Madeleine est en partie réalisée à partir de 26 puits municipaux répartis sur l'île de Havre-Aubert, l'île de Cap-aux-Meules et l'île de Havre-aux-Maisons. Ces captages municipaux et leurs réservoirs de distribution permettent de soutenir l'alimentation en eau potable des secteurs desservis, y compris durant les périodes de forte demande.

Suite au constat d'un manque d'informations et d'homogénéité en ce qui a trait à leurs paramètres hydrodynamiques, il a été décidé de procéder à une campagne d'essais de pompage sur tous ces ouvrages municipaux. La programmation des essais de pompage devait prendre en compte différents points :

- plusieurs des puits municipaux peuvent hydrauliquement s'influencer durant le pompage;
- la gestion des réseaux d'aqueduc ne peut supporter une interruption dans le ravitaillement en potable de la population, particulièrement élevé durant la saison des pêches et celle du tourisme.

### 2.2.1 Principes d'un essai de pompage

Un essai de pompage consiste à pomper de l'eau dans un puits, à un débit donné, tout en mesurant régulièrement le niveau piézométrique dans ce puits et dans les puits voisins, c'est-à-dire l'évolution de la charge hydraulique dans la nappe autour du puits pompé. Les valeurs du débit et des niveaux d'eau ainsi obtenues permettent de :

- déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité  $T$  et coefficient d'emmagasinement  $S$ ) dans le voisinage du puits de pompage;
- d'évaluer l'importance du rabattement de l'eau dans le puits d'exploitation.

Les paramètres hydrodynamiques peuvent être calculés avec les mesures obtenues durant le pompage (c'est-à-dire durant la descente des niveaux d'eau) ou après l'arrêt du pompage (c'est-à-dire durant la remontée des niveaux d'eau). Les essais peuvent durer de quelques heures à plusieurs jours et se font idéalement à débit constant. Également, il est souhaitable que la nappe soit préalablement à l'équilibre ce qui implique souvent d'arrêter le pompage plusieurs heures avant le début de l'essai.

### 2.2.2 Planification des essais de pompage

Afin de prendre en compte les particularités des captages municipaux et le besoin de ne pas interrompre l'approvisionnement en eau potable des réseaux, l'archipel a été subdivisé en secteur géographique de façon à :

- rechercher l'isolement d'un puits ou d'un groupe de puits;
- obtenir les conditions hydrogéologiques les plus favorables pour effectuer les essais.

Ainsi, tous les puits présents dans le voisinage immédiat d'un captage municipal à tester étaient coupés (mis à l'arrêt). L'arrêt des pompes sur ces puits permettait ainsi, dans un rayon de

plusieurs centaines de mètres autour du puits à tester, de reconstituer les conditions statiques de la nappe. Grâce à cette approche stratégique, les essais de pompage ont pu être réalisés sous des conditions satisfaisantes.

Le tableau 5 présente les dates de réalisation des essais de pompage effectués sur chacun des captages municipaux. La durée de l'essai a été généralement limitée à 24 heures pour des impératifs d'exploitation des réseaux d'aqueduc.

Puits	Localité	Date début pompage	Date fin pompage	Durée (min)	Date fin remontée	Durée (min)
PU-9	Cap-aux-Meules	03-04-23 09:00	03-04-24 08:35	1415	03-04-25 08:35	1440
PU-10	Cap-aux-Meules	03-04-25 08:45	03-04-25 16:45	480	03-04-26 16:45	1440
P-6	Etang-du-Nord	03-04-17 09:10	03-04-18 08:25	1395	03-04-19 08:25	1440
P-5	Etang-du-Nord	03-04-19 08:45	03-04-20 13:00	1695	03-04-21 13:00	1440
P-1	Etang-du-Nord	03-04-22 08:50	03-04-23 08:25	1415	03-04-24 08:25	1440
P-2	Etang-du-Nord	03-04-24 09:00	03-04-25 08:20	1400	03-04-26 08:20	1440
PU-6	Etang-du-Nord	03-04-28 08:45	03-04-29 08:20	1415	03-04-30 08:20	1440
PU-7	Etang-du-Nord	03-04-30 10:00	03-05-01 08:20	1340	03-05-02 08:20	1440
PU-8	Etang-du-Nord	03-05-02 08:25	03-05-03 13:00	1715	03-05-04 13:00	1440
PU-5	Etang-du-Nord	03-05-06 10:45	03-05-06 17:45	420	03-05-07 17:45	1440
P-3	Etang-du-Nord	03-05-09 09:15	03-05-10 14:20	1745	03-05-11 14:20	1440
P-4	Etang-du-Nord	03-05-12 08:50	03-05-13 08:25	1415	03-05-14 08:25	1440
P-7	Fatima	03-04-16 08:45	03-04-17 08:35	1430	03-04-18 08:35	1440
P-8	Fatima	03-04-18 08:45	03-04-19 08:20	1415	03-04-20 08:20	1440
PU-3	Fatima	03-04-29 09:00	03-04-30 08:45	1425	03-05-01 08:45	1440
PU-4	Fatima	03-05-01 08:45	abandon	n.a.	abandon	n.a.
PU-1	Fatima	03-05-05 08:55	03-05-06 08:55	1440	03-05-07 08:55	1440
PU-2	Fatima	03-05-07 08:30	03-05-08 08:50	1460	03-05-09 08:50	1440
P-3	Havre-Aubert	03-04-11 09:15	03-04-11 16:15	420	03-04-12 16:15	1440
P-4	Havre-Aubert	03-04-12 09:00	03-04-12 15:00	360	03-04-13 15:00	1440
P-1	Havre-Aubert	03-04-13 09:20	03-04-13 17:20	480	03-04-14 17:20	1440
P-2	Havre-Aubert	03-04-15 09:00	03-04-15 16:30	450	03-04-16 16:30	1440
P-1	Havre-aux-Maisons	03-05-13 09:40	03-05-14 08:55	1395	03-05-15 08:55	1440
P-3	Havre-aux-Maisons	03-05-14 09:10	03-05-15 08:50	1420	03-05-16 08:50	1440
P-4	Havre-aux-Maisons	03-05-15 09:15	03-05-16 08:55	1420	03-05-17 08:55	1440
P-2	Havre-aux-Maisons	03-05-16 09:15	03-05-16 16:45	450	03-05-16 16:45	0

**Tableau 5 : Essais de pompage réalisés sur les captages municipaux**

### 2.2.3 Réalisation des essais de pompage

Depuis 1993, les captages municipaux ont été équipés d'un système de télémétrie Ohméga complet avec débitmètres numériques et mesures de la profondeur des niveaux d'eau. Les captages P-1 et P-2 de l'Île de Havre-Aubert ne sont pas équipés de l'instrumentation électronique pour le suivi des niveaux d'eau. Le système Ohméga permet en théorie de suivre de façon continue :

- q les fluctuations des niveaux d'eau (puits et piézomètres adjacents);
- q les débits d'exploitation de chacun des captages municipaux.

Le Groupe-Conseil BPR, ingénieurs municipaux auprès de la municipalité des îles-de-la-Madeleine, a fixé les débits d'exploitation de chacun des puits sur la base des études

antérieures et des directives émises par le ministère de l'Environnement. De façon pragmatique, ces débits de balancement sont reconnus par la municipalité comme les débits d'exploitation des captages municipaux.

L'exploitation actuelle du système Ohméga ne permet pas de structurer, en terme chronologique, ni les mesures de niveaux d'eau, ni les valeurs de débit. Les archives électroniques de ce suivi ne sont donc pas disponibles. Seule une collection de rapports quotidiens imprimés était disponible pour les dernières années. Dans le cadre du présent projet, il a donc été nécessaire de saisir sur support informatique les rapports quotidiens couvrant la période 2000-2002, soit trois années de données plus ou moins complètes. L'enjeu de ce travail de saisie était de restituer les fluctuations piézométriques à chacun des captages municipaux en liaison avec les variations des débits. Il s'est avéré que les débits de pompage n'étaient quant à eux disponibles que pour les neuf derniers mois de l'année 2002. Suite à ce constat, les données ont été obtenues pour 2003 également.

Lors des essais de pompage, le système Ohméga devait servir à :

- q déterminer le débit d'exploitation des puits avant la réalisation de l'essai de pompage;
- q comparer le débit d'exploitation avec le débit de balancement recommandé;
- q déterminer le débit appliqué lors des essais de pompage;
- q enregistrer les données de la remontée du niveau d'eau dans le puits, remontée qui avait toujours lieu de nuit.

Par ailleurs, durant le jour, le Groupe Madelin'Eau mesurait la descente des niveaux d'eau dans le puits et les piézomètres avoisinants à l'aide de sondes électriques.

Suite à la réalisation des essais de pompage, le Groupe Madelin'Eau a constaté :

- q une dérive instrumentale du système Ohméga notamment des sondes de mesure des niveaux d'eau associée à un calage et à une calibration erronée;
- q des débits d'exploitation des captages municipaux excédant, parfois de façon significative, les débits de balancement recommandés par BPR.

Les écarts sont spécifiquement commentés dans les sections traitant de chaque île (documents No 2 et 3 du présent rapport).

#### **2.2.4 Statistiques des paramètres hydrodynamiques obtenus**

Le tableau 6 illustre les moyennes des transmissivités et des emmagasinevements déterminés par les essais de pompage. La porosité cinématique, calculée grâce aux informations fournies par la géophysique, complète ce tableau (ces valeurs seront discutées dans la section suivante traitant de la géophysique).

A l'échelle des trois îles étudiées, les transmissivités sont de l'ordre de  $4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s dans le membre de l'Etang-des-Caps (champs captants de l'Etang-du-Nord, Cap-aux-Meules, Fatima, Havre-Aubert et Havre-aux-Maisons) et de l'ordre de  $10^{-4}$  dans ou à proximité du membre de l'Etang-du-Nord (Etang-du-Nord – secteur ouest et versants des buttes de Fatima). Les coefficients d'emmagasinement montrent une forte variabilité due à l'importante hétérogénéité

des matériaux de recouvrement dans les secteurs captants. La porosité cinématique obtenue par les données de la géophysique est par contre relativement homogène avec des valeurs de l'ordre de 1 à 2,5 %.

Île	Secteur captant	Paramètres hydrodynamiques		
		T moyenne m <sup>2</sup> /s	S moyen -	Por. Cin. %
Île Centrale	EDN/CAM	3,9E-03	1,5E-03	2,0
	EDN-W	1,0E-04	-	1,5
	FAT	2,8E-03	1,2E-03	2,5
	FAT-P7P8	4,1E-04	8,3E-04	
Île-du-Havre-Aubert	HA	4,8E-03	3,1E-02	1,0
Havre-aux-Maisons	HAM	4,6E-03	1,2E-03	1,0

**Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques moyens obtenus des essais de pompage**

### **3 INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES**

#### **3.1 MISE EN ŒUVRE DES PROFILS GÉOPHYSIQUES**

Le Groupe Madelin'eau a mis en œuvre une méthode de prospection désignée tomographie de résistivité électrique (ERT). Cette méthode, qui a vu le jour dans les années 1990, est basée sur le même principe physique que les méthodes antérieures de prospection électrique (sondages verticaux et trainés horizontaux).

Le courant électrique circule plus ou moins facilement au travers des sols et des roches en fonction de la nature lithologique du terrain (l'argile par exemple facilite le passage du courant électrique), de la quantité d'eau qu'il renferme et de la salinité de cette eau (une roche contenant une grande quantité d'eau salée est très conductrice de courant). Ainsi, dans le contexte des Îles-de-la-Madeleine, la méthode est particulièrement optimale pour la mise en évidence de l'interface eau douce / eau salée.

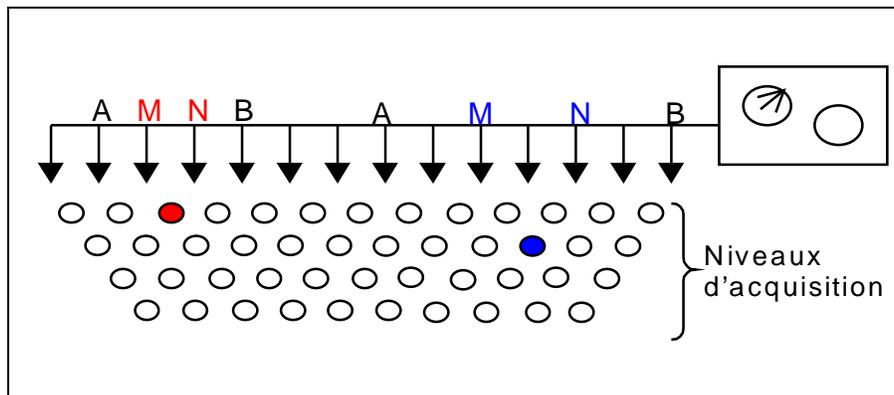
Une investigation géophysique électrique consiste donc à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité connue et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux points donnés. La tomographie 2D permet d'obtenir une section verticale continue de la résistivité électrique le long du profil réalisé. La méthode classique du sondage électrique plus couramment utilisée est limitée par le fait qu'elle ne prend pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. L'imagerie 2D permet de palier à cette lacune et recherche même à caractériser cette particularité.

L'acquisition des mesures utilise un grand nombre d'électrodes connectées à des câbles multi-conducteurs. L'ordinateur de terrain, dans lequel est programmée la séquence de mesures, est relié à une boîte de commutation qui sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel. La séquence de mesure génère un grand nombre de résultats sous la forme d'un fichier directement utilisable par le modèle de calcul géophysique.

Il existe plusieurs dispositifs pour obtenir une tomographie de résistivité électrique. Les plus utilisés dans la prospection géophysique sont les dispositifs Wenner, Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle. Chacun répond à une situation d'investigation spécifique. Par exemple, si l'on recherche des structures verticales dans une zone qui n'est pas trop bruitée, il est recommandé d'utiliser un dispositif Dipôle-Dipôle. En présence d'un terrain bruité et sans aucune connaissance préalable de la géométrie du réservoir géologique à investiguer, un dispositif Wenner-Schlumberger sera de préférence utilisé.

Dans le cas d'une recherche de structures horizontales (nappe d'eau souterraine), le dispositif Wenner paraît le plus adapté. C'est pourquoi, le Groupe Madelin'Eau a sélectionné ce dispositif pour localiser l'interface eau douce / eau salée, lorsque présent. La configuration du dispositif d'acquisition est illustrée à la figure 3.

Les valeurs obtenues sur le terrain sont des résistivités apparentes. En effet, la mesure représente une valeur intégrant les résistivités vraies d'un certain nombre de petits volumes du sous-sol. A partir de ces valeurs de résistivités apparentes, on cherche à retrouver la position et la résistivité vraie des différents matériaux présents. Les résistivités calculées par les puissants outils de calcul sont relativement proches des résistivités réelles des matériaux.



**Figure 3 : Dispositif de mesure Wenner (permettant la caractérisation des sous-blocs)**

Le matériel utilisé dans le projet est :

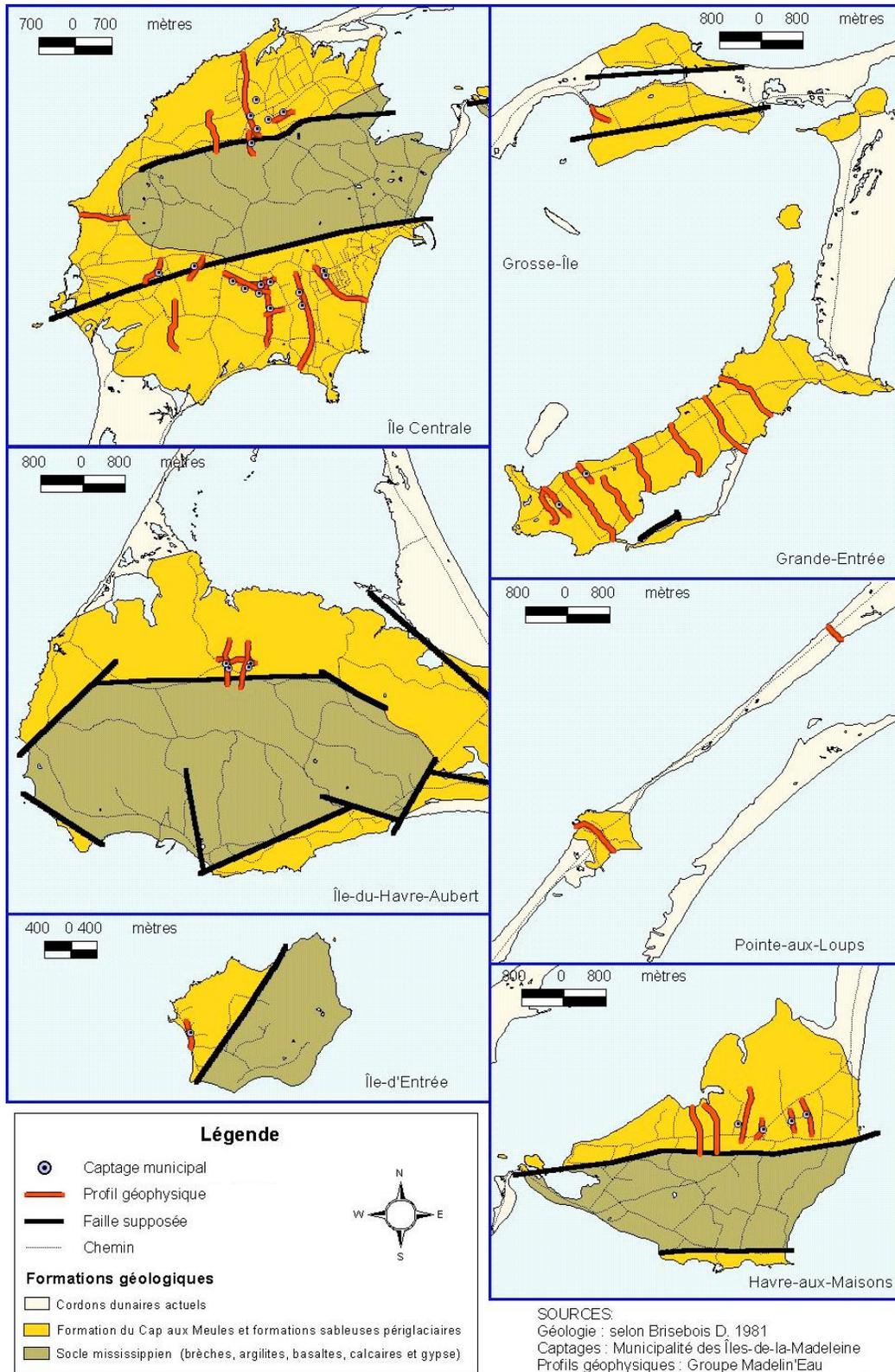
- q TERRAMETER ABEM SAS 300B;
- q sélecteur d'électrode ABEM ES 464;
- q système LUND, composé de 4 flûtes électriques (longueur 100m), avec 64 sorties, à intervalles réguliers (5m);
- q ordinateur portable pour l'acquisition des données;
- q logiciel d'inversion RES2DINV (MH LOKE).

### 3.2 CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE DES STRUCTURES HYDROGÉOLOGIQUES

Près de trente deux (32) kilomètres cumulés de panneaux électriques ont été levés sur la totalité de l'archipel (excepté l'île Brion). Plusieurs types de structures hydrogéologiques ont pu être mises en évidence. La figure 4 précise la localisation des trente-cinq (35) profils géophysiques réalisés, tandis que la figure 5 illustre quelques cas typiques de contextes mis en évidence par la géophysique.

Le profil levé sur l'île de Pointe-aux-Loups, débutant en bordure du Golfe du Saint-Laurent pour se terminer en bordure de la lagune de Grande-Entrée (figure 5-a) présente le cas type d'une nappe d'eau douce en milieu insulaire. En effet, on observe clairement l'eau salée, de résistivité inférieure à 10 ohm.m, formant deux biseaux plongeant vers l'intérieur de l'île pour s'y rejoindre. La nappe d'eau douce (de résistivité de l'ordre de 20 à 100 ohm.m) repose sur les niveaux saumâtres inférieurs du fait de sa densité plus faible (1000 versus 1035 g/L) (l'eau douce flotte sur l'eau salée, de la même façon que la glace flotte sur l'eau). La transition eau douce / eau salée semble se faire de façon progressive, ce qui se traduit en géophysique par des variations de résistivité plus continues.

La section effectuée à la Pointe de Grande-Entrée (figure 5-b) montre l'intrusion saline (dôme d'eau saumâtre) provoqué par le pompage soutenu des puits de l'usine Madelimer. L'interface eau douce / eau salée, qui devrait naturellement plonger vers le centre de l'île comme à Pointe-aux-Loups, est ici aspirée vers le haut par le puits de pompage.



**Figure 4 : Localisation des profils géophysiques réalisés**

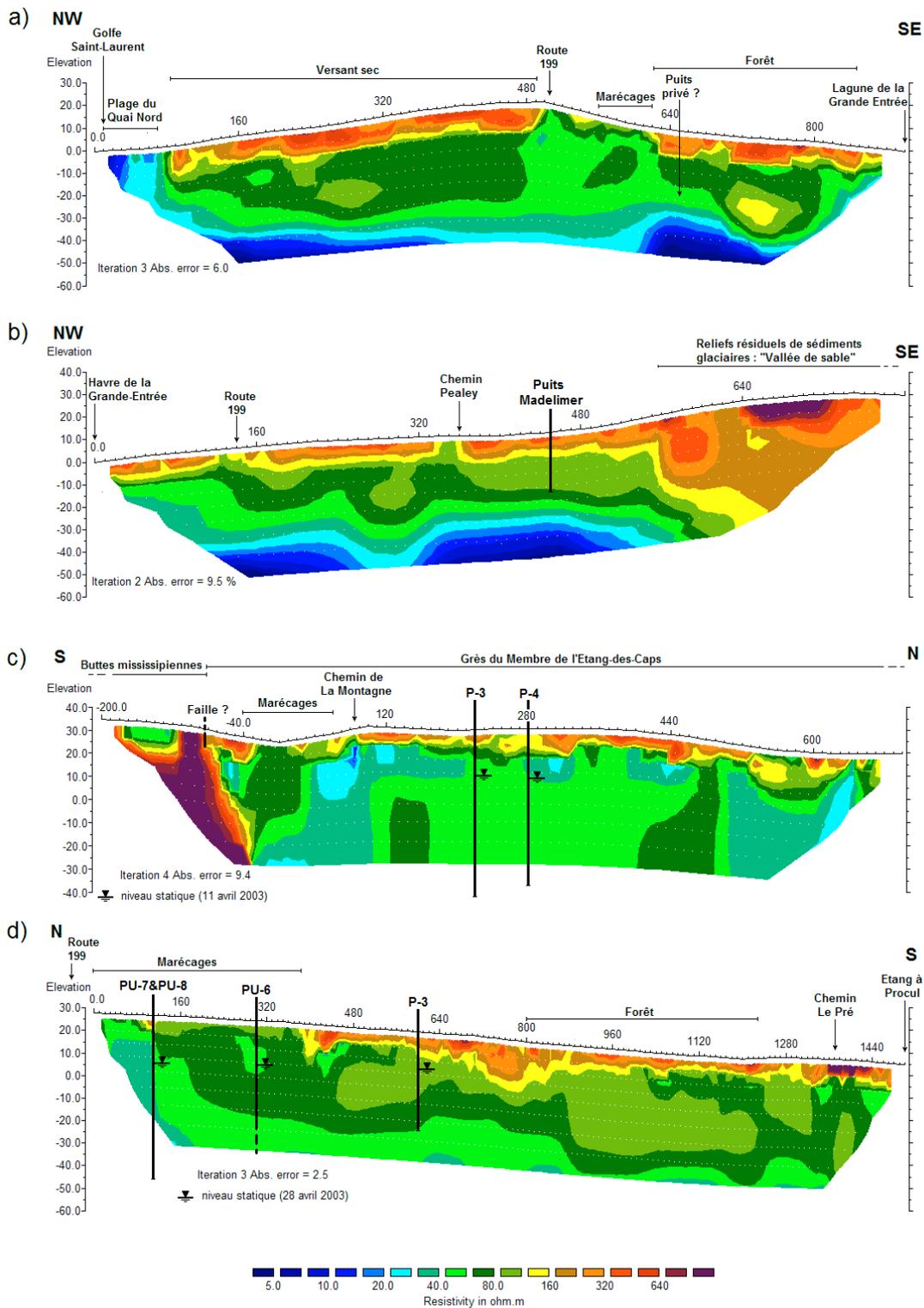


Figure 5 : Quelques sections géophysiques types

Le profil réalisé à La Montagne (Île-de-Havre-Aubert), révèle le contact entre deux ensembles hydrogéologiques très différents liés aux caractéristiques des formations géologiques (figure 5-c). Au sud de ce contact, les niveaux très résistants (en rouge) témoignent de la présence du horst constitué de roches mississippiennes peu poreuse (sans eau). Au contraire, au nord du contact les terrains aquifères (constitués de grès) sont mis en évidence par les résistivités beaucoup plus faibles, preuve de la présence d'une nappe d'eau.

Finalement, le levé réalisé à Lavernière, de la route 199 à l'Etang à Procul et passant par les captages PU-7, PU-8 et P-3 (figure 5-d), fournit un exemple de remontées verticales engendrés par des puits à gros débit. Des anomalies conductrices sont en effet visibles à la base de la section sous les puits P-3 et PU-7 – PU-8. On observe également que les conditions hydriques de surface sont bien représentées par cette technique puisque les zones humides apparaissent clairement dans une gamme de résistivités de 40 – 100 ohm.m (milieu saturé en eau douce), alors que les sols secs apparaissent très résistants.

### **3.3 DÉTERMINATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT PAR GÉOPHYSIQUE**

Outre son utilité descriptive qualitative, la tomographie électrique fournit également des informations quantitatives de première importance sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu. En effet, la dérive d'anomalies géoélectriques a pu être observée, permettant ainsi de déterminer les vitesses d'écoulement de la nappe. Deux types d'anomalies-traceurs sont à distinguer.

Le premier type de traceurs géophysiques correspond aux cônes de remontée à l'aplomb des captages (voir figure 6). Les cônes apparaissent en saison estivale lorsque le prélèvement des puits est maximal. Lorsque la pression se relâche à l'automne, ils dérivent par l'entraînement naturel de la nappe, en s'atténuant plus ou moins. Deux pics consécutifs représentant deux étés consécutifs, la distance les séparant sur une section géophysique traduit la distance parcourue en une année.

Le second type de traceurs correspond aux anomalies conductrices apparaissant en surface de nappe et engendrées par les contaminations de sels de déglacage épandus sur les routes (voir figure 7). Le principe est le même que pour les remontées salines : la distance séparant deux anomalies conductrices traduit la distance parcourue en une année. Parfois, deux anomalies salées apparaissent, correspondant aux épandages de fin d'automne et de fin d'hiver.

Les résultats fournis par les deux types de traceurs sont cohérents et donnent des vitesses d'écoulement moyennes sur l'archipel de l'ordre de 200 m/an (entre 170 et 270 m/an). La détermination de ce paramètre est de première importance puisqu'il permet, en couplage avec les résultats des essais de pompage, de calculer la porosité cinématique nécessaire au tracé des périmètres de protection (voir section traitant des périmètres d'intervention – ParaPol et la section des périmètres de protection – MODFLOW).

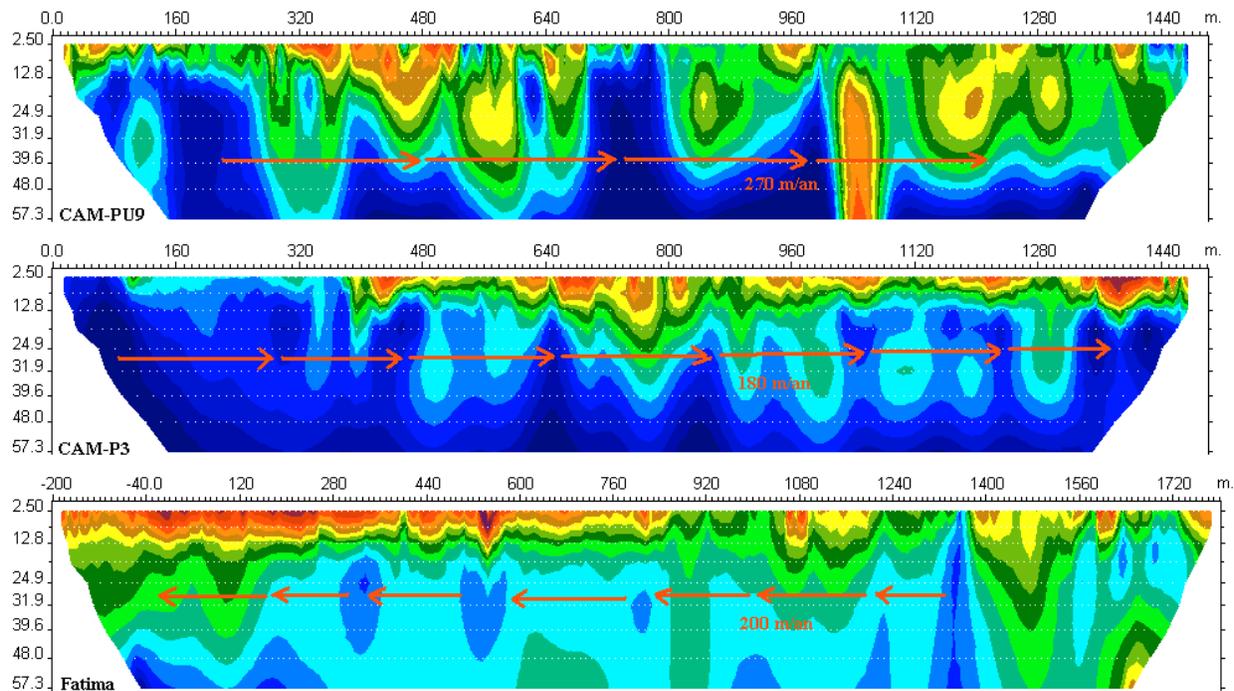


Figure 6 : Vitesse de dérive des remontées salines

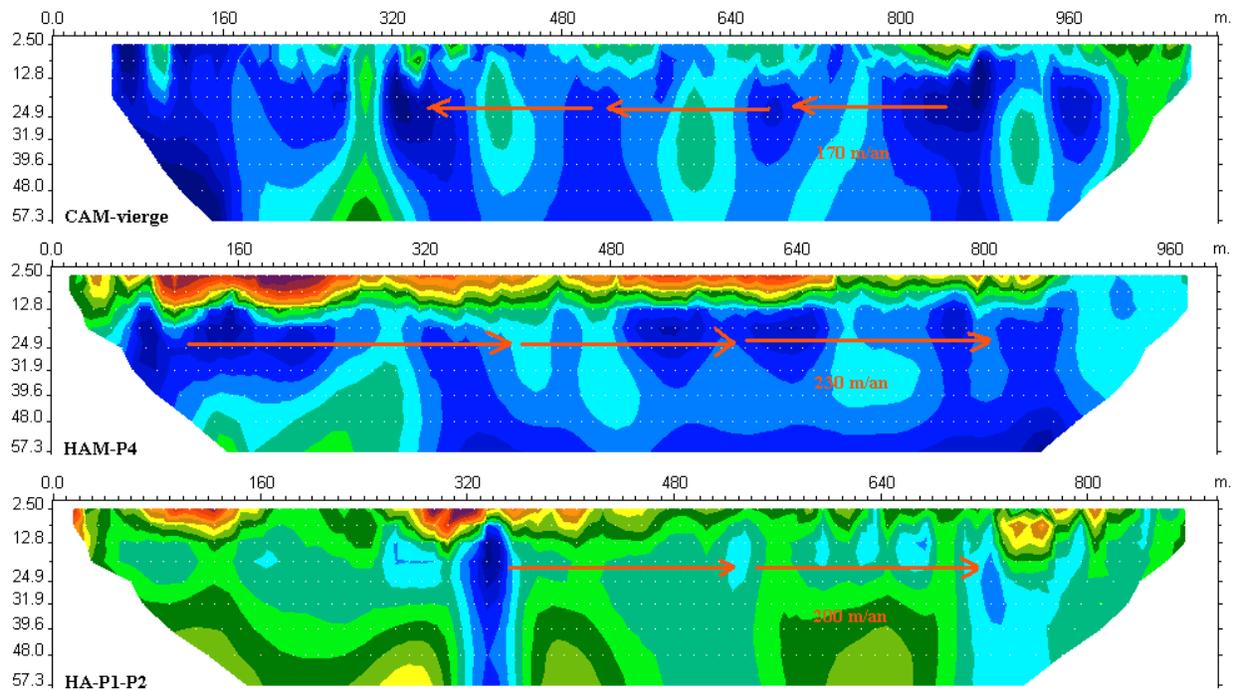


Figure 7 : Vitesse de dérive des traces de sels déglacants

## 4 CARTOGRAPHIE DES ACTIVITÉS À RISQUE

### 4.1 DÉTERMINATION DES PÉRIMÈTRES D'INTERVENTION (PARAPOL)

L'inventaire des diverses sources de pollution est primordial car il constitue l'information de base des futures mesures de protection – gestion à prendre à l'intérieur des périmètres de protection bactériologique et virologique tels que définis par le RCES. Eu égard aux objectifs du présent projet, l'outil ParaPol a été appliqué afin d'orienter ces travaux d'inventaire autour des captages municipaux. La délimitation définitive et réglementaire des périmètres a été effectuée par la mise en œuvre de la modélisation régionale réalisée à l'aide du modèle de simulation MODFLOW.

ParaPol a ainsi permis de déterminer, à cette étape et de façon préliminaire, les aires d'alimentation et les isochrones (200 jours et 550 jours) autour des différents captages municipaux pour les besoins propres de l'inventaire des activités à risque dans leur voisinage.

L'outil ParaPol, développé par Banton et al. (1998), est un logiciel de délimitation de l'aire d'alimentation et des périmètres d'intervention des puits de captage. Il est basé sur l'utilisation de deux solutions analytiques de l'écoulement engendré par un puits dans une nappe régionale elle-même en écoulement. Les équations analytiques sont celles de la zone d'appel et celle du temps de transfert (Bear et Jacob, 1965) (dont une solution simplifiée est celle de Todd, 1980, préconisée par le Ministère de l'Environnement).

Comme pour toute solution analytique, l'application des équations de la zone d'appel et des temps de transfert doit respecter un certain nombre d'hypothèses. Les principales hypothèses et leurs entraves sont les suivantes :

<b>Hypothèses des solutions analytiques</b>	<b>Entraves à l'application des solutions</b>
Le milieu est infini	Il existe une limite à proximité ou dans la zone d'appel
Le milieu est homogène et isotrope pour les différents paramètres	Les valeurs des paramètres présentent une variabilité spatiale significative
L'écoulement a lieu dans un milieu poreux (l'écoulement suit la Loi de Darcy)	Le milieu est fissuré
L'écoulement est seulement influencé par l'écoulement régional et par le pompage	Présence d'une batterie de puits, d'un champ captant ou d'autres puits dans le voisinage
Le régime d'écoulement (écoulement régional et pompage) est permanent	Fluctuation saisonnière de l'écoulement ou des prélèvements par le puits

Un certain nombre de paramètres hydrauliques et hydrogéologiques sont à prendre en compte pour calculer et tracer les aires d'alimentation et les isochrones. Ces paramètres proviennent pour la plupart des essais de pompage de l'été 2003 ainsi que des résultats de la géophysique et de la modélisation MODFLOW. Le tableau 7 récapitule les paramètres utilisés.

Captage municipal	Paramètres hydrogéologiques					Paramètres géométriques de l'aire d'alimentation		
	Débit annuel moyen m <sup>3</sup> /s	Gradient hydraulique (*) m/m	Transmissivité de l'aquifère (**) m <sup>2</sup> /s	Épaisseur de l'aquifère (*) m	Porosité cinématique (***) s.u.	A m	L m	B m
<b>Cap-aux-Meules</b>								
PU9	0.0025	0.0038	3.1E-03	54	0.020	34	212	106
PU10	0.0020	0.0038	3.1E-03	54	0.020	27	170	85
<i>PU9+PU10</i>	<i>0.0044</i>	<i>0.0038</i>	<i>3.1E-03</i>	<i>54</i>	<i>0.020</i>	<i>59</i>	<i>374</i>	<i>187</i>
<b>L'Etang-du-Nord</b>								
P1	0.0021	0.0035	3.1E-03	54	0.020	31	194	97
P2	0.0037	0.0035	3.1E-03	53	0.020	54	341	171
P3	0.0049	0.0035	3.1E-03	54	0.020	72	452	226
P4	0.0029	0.0035	3.1E-03	56	0.020	43	267	134
P5	0.0029	0.0035	3.1E-03	57	0.020	43	267	134
PU6	0.0035	0.0035	3.1E-03	55	0.020	51	323	161
PU7	0.0008	0.0035	3.1E-03	55	0.020	11	72	36
PU8	0.0023	0.0035	3.1E-03	55	0.020	34	212	106
P6	0.0020	0.0330	2.1E-04	65	0.015	46	289	144
PU5	0.0034	0.0330	2.1E-04	67	0.015	78	491	245
<b>Fatima</b>								
PU1	0.0033	0.006	1.7E-03	59	0.025	52	324	162
PU2	0.0027	0.006	1.0E-03	59	0.025	72	450	225
PU3	0.0029	0.003	1.7E-03	58	0.025	91	569	284
PU4	0.0019	0.003	1.7E-03	57	0.025	59	373	186
P7	0.0014	0.066	9.2E-05	80	0.025	37	231	115
P8	0.0014	0.066	9.2E-05	65	0.025	37	231	115
<b>Ile-du-Havre-Aubert</b>								
P1	0.0060	0.0012	1.2E-02	59	0.01	66	417	208
P2	0.0063	0.0012	1.2E-02	59	0.01	70	438	219
P3	0.0030	0.0020	5.9E-03	59	0.01	40	254	127
P4	0.0030	0.0020	5.9E-03	59	0.01	40	254	127
<i>P1+P2</i>	<i>0.0123</i>	<i>0.0012</i>	<i>1.2E-02</i>	<i>59</i>	<i>0.01</i>	<i>136</i>	<i>854</i>	<i>427</i>
<i>P3+P4</i>	<i>0.0060</i>	<i>0.0020</i>	<i>5.9E-03</i>	<i>59</i>	<i>0.01</i>	<i>81</i>	<i>508</i>	<i>254</i>
<i>tous</i>	<i>0.0183</i>	<i>0.0015</i>	<i>8.9E-03</i>	<i>59</i>	<i>0.01</i>	<i>218</i>	<i>1371</i>	<i>685</i>
<b>Ile du Havre-aux-Maisons</b>								
P1	0.0023	0.0008	5.0E-03	55	0.010	92	575	288
P2	0.0022	0.0008	5.0E-03	55	0.010	88	550	275
P3	0.0022	0.0010	5.0E-03	55	0.010	70	440	220
P4	0.0024	0.0010	5.0E-03	55	0.010	76	480	240

(\*) : d'après les résultats de la modélisation ModFlow

A : distance du puits au point de stagnation

(\*\*) : d'après le couplage essais de pompages-modélisation

L : largeur maximale de l'aire d'alimentation

(\*\*\*) : d'après le couplage géophysique-modélisation

B : largeur de l'aire d'alimentation à hauteur du puits

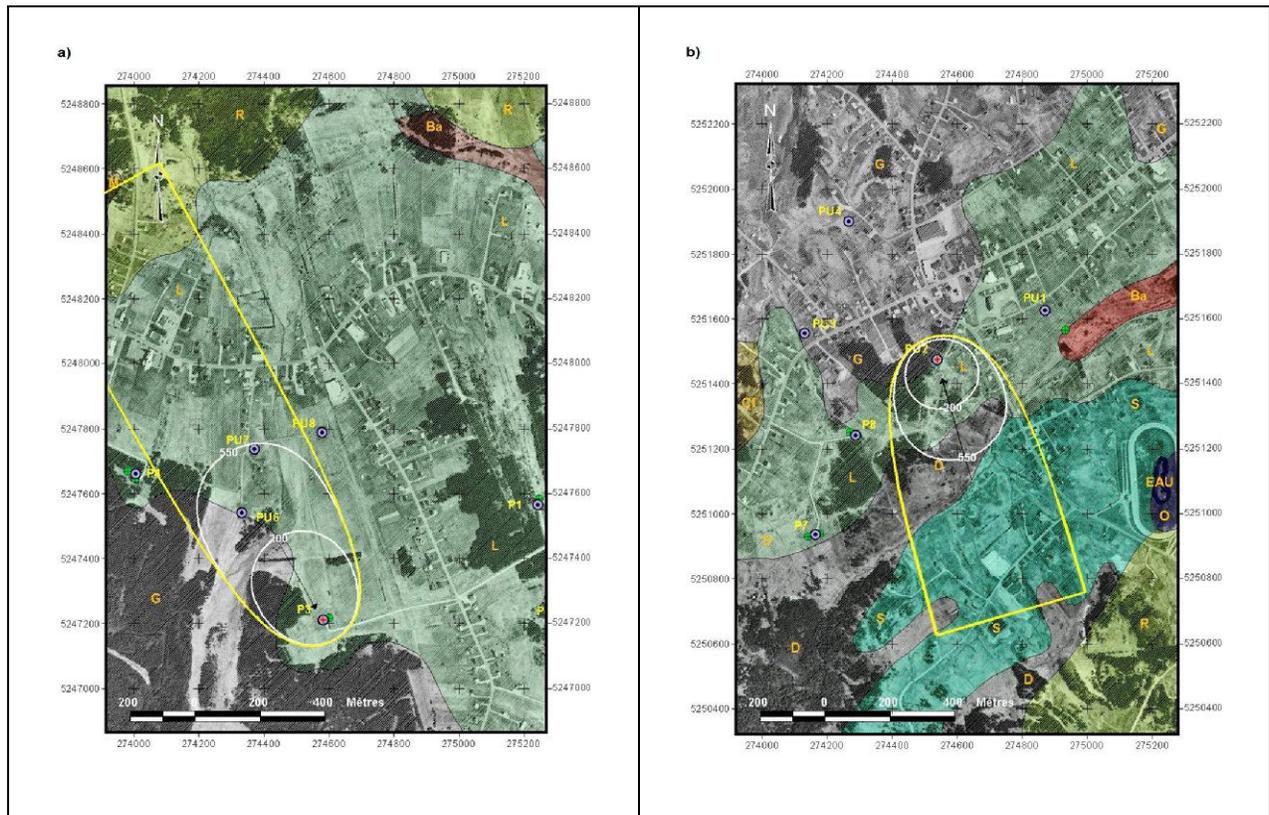
**Tableau 7 : Dimension des périmètres d'intervention calculés avec ParaPol**

Le débit de pompage annuel moyen est extrait de la banque de données Ohméga de la municipalité. Le gradient hydraulique (pente de la surface piézométrique) a été calculé dans un premier temps à partir des niveaux observés dans les puits au repos et de leur distance à la mer, confirmé ou précisé par la suite par la piézométrie obtenue de la modélisation MODFLOW. Les transmissivités utilisées dans les calculs sont tirées de l'interprétation des essais de pompage à une échelle sectorielle, en cohérence avec les résultats de la modélisation.

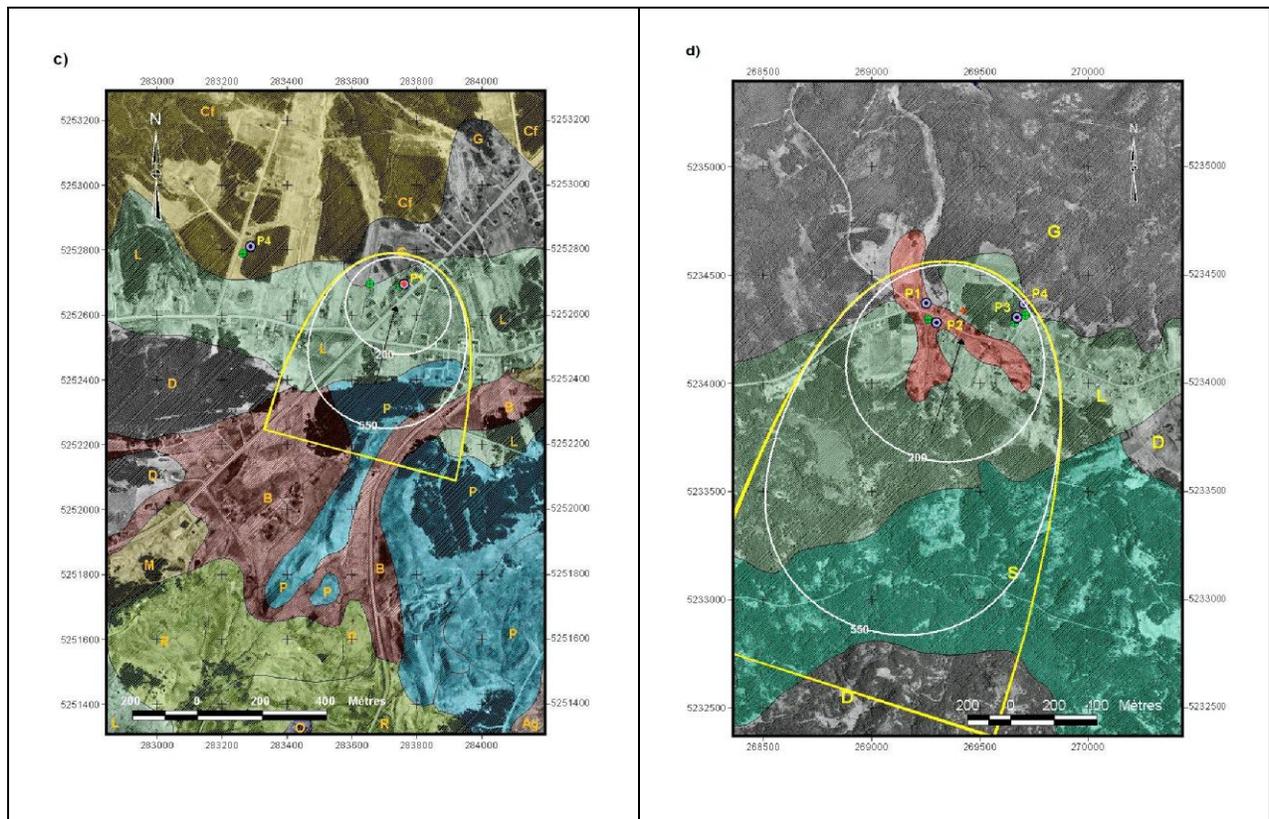
L'épaisseur de la zone saturée, en relation directe avec la profondeur du mur de l'aquifère est très rarement connue aux Îles-de-la-Madeleine, du fait d'une lacune documentaire importante concernant les coupes géologiques et techniques des forages d'eau. La plupart des puits des

Îles ayant une profondeur totale d'environ 60 m et une hauteur d'eau dans le puits d'environ 50 m, l'épaisseur de la zone saturée conductrice est considérée de cette même épaisseur. La recharge intervient directement dans l'extension de l'aire d'alimentation. Plusieurs estimations de cette recharge ont été faites dans le passé. La valeur retenue est de 230 mm/an, calculée pour l'année 1980 par Leblanc (1994) et intermédiaire entre celle de 234 mm/an évaluée par Sylvestre (1979) et celle de 228 mm/an fournie par Bilodeau (1993).

La porosité cinématique est un paramètre fondamental pour la caractérisation des temps de séjour de l'eau au sein de l'aquifère et donc des contaminants potentiels associés. Elle conditionne la position des isochrones et donc des périmètres de protection. C'est une valeur généralement comprise, dans le cas des nappes isotropes, entre la porosité efficace (emmagasinement des nappes libres) et la porosité totale (toute l'eau contenue dans l'aquifère saturé). En l'absence d'essais de traçage, elle n'est pas connue. Toutefois, suite à l'interprétation des levés géophysiques (voir section précédente), la porosité cinématique a pu être déterminée directement à l'aide des mesures de terrain, par observation géophysique de la dérive des anomalies conductrices observées (intrusion saline ou sels déglaçants).



**Figure 8 : Exemples de périmètres d'intervention déterminés avec ParaPol  
(a : P-3 à Etang-du-Nord ; b : PU-2 à Fatima)**



**Figure 8 bis : Exemples de périmètres d'intervention déterminés avec ParaPol  
(c : P-1 à Havre-aux-Maisons et d : P-1+P-2+P-3+P-4 à La Montagne)**

La figure 8 illustre des périmètres d'intervention obtenus avec ParaPol sur fond de carte pédologique. Dans la plupart des cas, un périmètre est tracé pour chacun des puits. Dans les cas où plusieurs captages sont implantés proches l'un de l'autre, c'est-à-dire à moins d'une centaine de mètres comme à Havre-Aubert, La Montagne (P-1 à P-4), un seul jeu de périmètres est tracé pour le groupe de puits (figure 8-d). Un puits équivalent fictif est positionné au centre des différents captages affectés d'un débit correspondant à la somme des débits des puits.

#### 4.2 INVENTAIRE DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION

Les sources potentielles de contamination ont été inventoriées selon une codification et une hiérarchisation précises. Elles ont été classées par thème à partir des observations faites sur le terrain. Une hiérarchisation a été également réalisée selon le risque que pouvaient représenter la source contaminante vis-à-vis de la consommation humaine et de l'environnement. Chaque source de contamination inventoriée est décrite selon sa nature et sa dangerosité. Ainsi, ont été inventoriées :

- *cimetière pour les risques de contamination (épidémie) bactériologique (isochrone 200 jours) ou virologique (isochrone 550 jours) et par les nitrates;*

- q *zone d'habitation* pour les risques de contamination domestique comme :
  - ü *puisards et fosses septiques* : contamination bactériologique (isochrone 200 jours) et virologique (isochrone 550 jours);
  - ü *puits privé* : contamination de natures variées (organique, minérale, etc.) car possibilité de rejets divers en accès direct à la nappe;
  - ü *propriétés privées* : utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires pour les gazons et jardins;
  - ü *cuves à fuel (mazout)* : contamination potentielle aux hydrocarbures due à une fuite éventuelle.
  
- q *station service et garage de réparation automobile* pour les risques de pollution aux hydrocarbures et aux métaux lourds liés aux fuites accidentelles ou infiltration de produits contaminants;
  
- q *carcasse automobile et dépôt clandestin* pour les risques d'infiltration de lixiviats induits par les précipitations (métaux lourds, hydrocarbures de réservoir, liquide de batteries, etc.);
  
- q *surface imperméabilisée et zone de livraison pour camions* pour les risques d'infiltration vers la nappe des eaux de ruissellement qui peuvent collecter les hydrocarbures ou autres produits, de nature organique ou minérale, toxiques pour la consommation humaine (par exemple reliés aux fuites sur les stationnements de véhicules);
  
- q *zone de commerces et industrielles* pour les risques de contamination accidentelle de nature organique ou minérale selon l'activité de l'entreprise inventoriée;
  
- q *zone inondable, cours d'eau permanent ou intermittent, lac artificiel, zone marécageuse* (zone d'alimentation préférentielle de la nappe), pour les risques d'infiltration d'eau contaminée vers les eaux souterraines;
  
- q *activité agricole* comme les fermes, les pâturages, les cultures et les serres, pour les risques d'infiltration de produits azotés ou phosphorés (engrais) ou de produits phytosanitaires (pesticides) fréquemment utilisés dans ce type d'activité;
  
- q *carrière et sablière* pour les risques de contamination, tel les rejets des véhicules de chantier ou autres, mis en contact direct avec les eaux souterraines;
  
- q *vieilles bâtisses* pour le risque de fuites d'un vieux *réservoir de mazout* (hydrocarbures), d'un *vieux puisard* (bactériologique ou virologique), de l'existence d'un *vieux puits* pouvant servir de lieu de rejet de produits de nature diverse ou pour le risque que l'édifice serve de stockage de produits toxiques pour la consommation humaine.

## 5 CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX SOUTERRAINES

Contrairement aux puits municipaux dont la fréquence d'échantillonnage et les paramètres à analyser sont dictés par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP), les puits individuels utilisés par les citoyens non desservis par un réseau d'aqueduc ne font l'objet d'aucun contrôle qualitatif obligatoire. En conséquence, à part quelques analyses ponctuelles effectuées par certains citoyens (informations verbales obtenues lors des prélèvements), aucune couverture qualitative de l'eau provenant de ces ouvrages de captage n'avait été réalisée jusqu'à présent.

Un échantillonnage spécifique a donc été réalisé au cours des deux premières semaines du mois d'août 2003 sur les îles non desservies par un réseau d'aqueduc, soit Pointe-aux-Loups, Grosse-Île, Île de La Grande-Entrée et Île d'Entrée. Les prélèvements ont été réalisés par des membres d'Attention Frag'Îles, organisme partenaire du projet. Les échantillons ainsi prélevés ont été acheminés quotidiennement par avion au laboratoire du Centre spécialisé des pêches à Grande-Rivière pour l'analyse bactériologique. Pour les paramètres physico-chimiques, les échantillons ont été acheminés au laboratoire Biologie Aménagement BSL de Rimouski.

Au total, 81 emplacements ont été visités et échantillonnés pour trois paramètres bactériologiques (coliformes totaux, coliformes fécaux et colonies atypiques) et deux paramètres physico-chimiques (chlorures et nitrates-nitrites). Quatre de ces paramètres sont reliés à la santé (bactériologiques et nitrates-nitrites) alors que l'analyse des chlorures a été retenue afin de pouvoir évaluer la possibilité d'intrusion saline dans l'environnement de ces captages. La répartition des prélèvements est la suivante :

- q Pointe-aux-Loups : 16 échantillons
- q Grosse-Île : 21 échantillons
- q Île de La Grande-Entrée : 28 échantillons
- q Île d'Entrée : 16 échantillons

De façon générale, à l'exception de quelques puits, la qualité bactériologique de l'eau peut être qualifiée de bonne. Nous avons noté l'absence totale de coliformes fécaux pour tous les échantillons, cinq d'entre eux seulement présentant par ailleurs une concentration supérieure à 10 coliformes totaux. Trois de ces derniers apparaissent à l'Île d'Entrée alors que les deux autres se retrouvent à Grosse-Île. Quant aux colonies atypiques, leur absence a été constatée à peu près partout, de faibles concentrations apparaissant ici et là et un seul endroit (Grosse-Île) a présenté une valeur supérieure à 200 UFC / 100 mL.

Quant aux paramètres physico-chimiques, la présence de nitrates-nitrites est préoccupante, sans être cependant alarmante. Dans l'ensemble des sites prélevés, 65 d'entre eux présentent une concentration supérieure à 1 mg-N/L, donc supérieure au bruit de fond des eaux naturelles. La concentration moyenne par île est la suivante :

- q Pointe-aux-Loups : 5,4 mg/L
- q Grosse-Île : 1,92 mg/L
- q Île de La Grande-Entrée : 2,75 mg/L
- q Île d'Entrée : 3,74 mg/L

L'ensemble des concentrations reflètent une contamination pouvant être reliée aux installations septiques, particulièrement dans un environnement géologique aussi vulnérable que celui des îles. Deux des puits analysés ont même présenté des concentrations supérieures (à peine supérieures cependant) à la norme de potabilité de 10 mg-N/L : un à l'Île d'Entrée et un à l'Île de La Grande-Entrée.

En ce qui concerne les chlorures, sept des sites échantillonnés ont présenté une concentration supérieure à 250 mg/L, représentant l'objectif esthétique (gustatif), à partir de laquelle le goût salé est perçu. Trois de ces puits sont situés sur l'Île de La Grande-Entrée, deux à Grosse-Île et deux à Pointe-aux-Loups. La concentration la plus élevée se retrouve à Pointe-aux-Loups, avec une valeur de 660 mg/L. La concentration moyenne par île est la suivante :

- q Pointe-aux-Loups : 170 mg/L
- q Grosse-Île : 120 mg/L
- q Île de La Grande-Entrée : 162 mg/L
- q Île d'Entrée : 66 mg/L

Ces résultats sont discutés de façon détaillée dans les sections de ce rapport final traitant spécifiquement des îles concernées de l'archipel (voir Document No 3).

## **6 MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS (MODFLOW)**

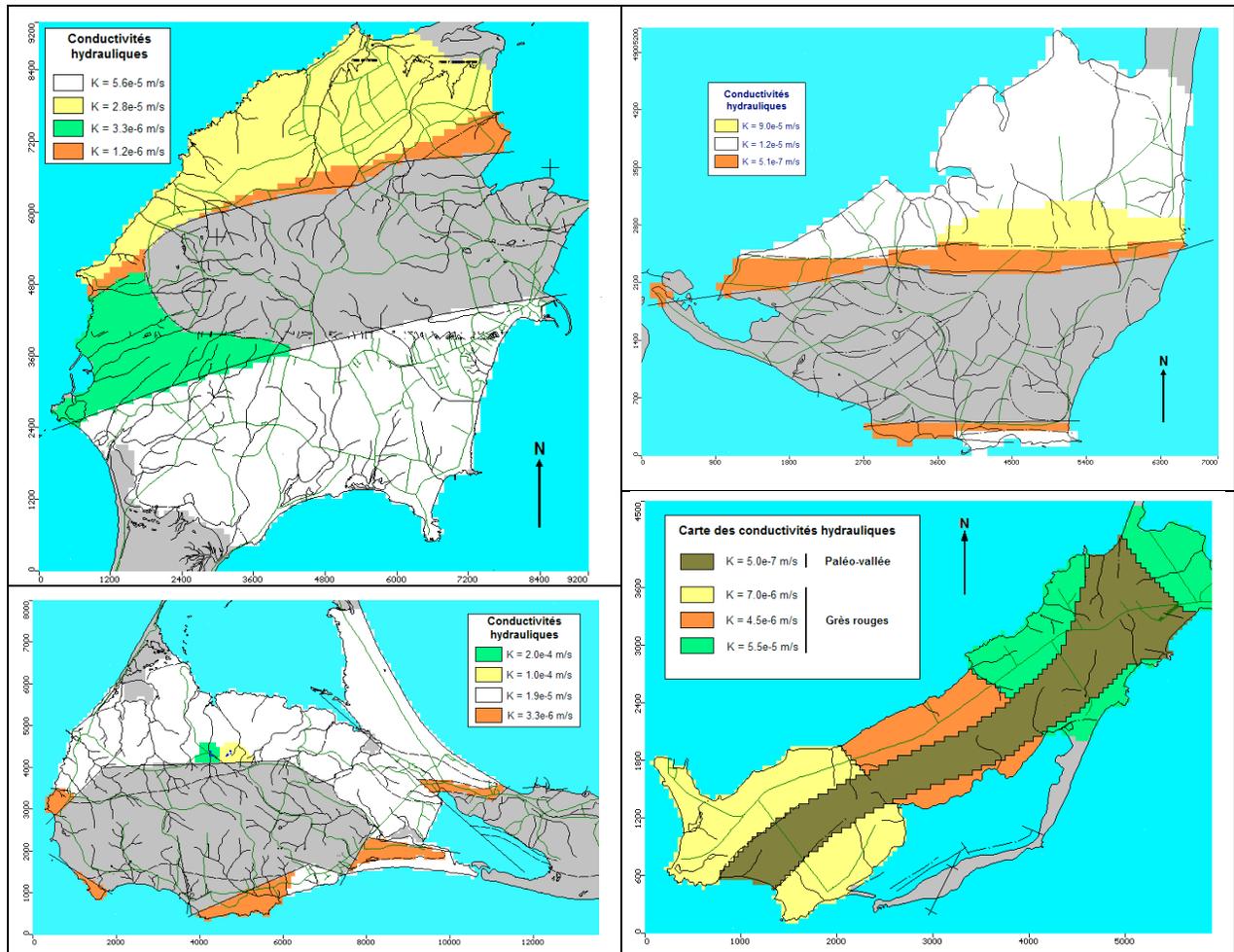
Un premier type de modélisation hydrogéologique a été réalisé à l'aide du modèle MODFLOW (interface Waterloo Hydrogeologic - version 2.8.2.8). Cette modélisation visait à évaluer la capacité support des ressources d'eau souterraine au travers des îles desservies par un réseau d'aqueduc (îles suffisamment documentées pour faire l'objet d'une modélisation). Considérant le manque d'informations historiques, la modélisation a été réalisée pour un régime permanent d'une part, et pour un régime transitoire moyen d'autre part, c'est-à-dire pour une succession d'années théoriques semblables, constituées chacune de douze périodes mensuelles variables. Ceci a permis de comparer les résultats de modélisation avec des observations piézométriques pertinentes. A l'automne 2004, une modélisation des écoulements a également été réalisée pour l'Île de La Grande-Entrée, afin de répondre à certains questionnements soulevés par la municipalité dans le cadre d'un projet de desserte en eau potable du secteur de la Pointe.

Les différents modèles hydrogéologiques développés avec MODFLOW considéraient une seule couche de matériau aquifère, son plancher étant arbitrairement fixé à -50 m/nmm (à -75 m/nmm pour la modélisation de l'Île de La Grande-Entrée). Le matériau aquifère a représenté selon les lieux les grès rouges du membre de l'Etang-des-Caps ou les grès rouges et gris-verts du membre de l'Etang-du-Nord. Les formations centrales des îles (correspondant aux zones de horst) n'ont pas été prises en compte dans les modèles, du fait de leur faible perméabilité et de l'absence de mesure de transmissivité caractérisant leurs formations géologiques. Dans ce dernier domaine (zone des horsts), les écoulements sont supposés avoir lieu soit par écoulement de surface, soit par écoulement hypodermique, c'est-à-dire dans les matériaux meubles de recouvrement et dans les sols de surface.

### **6.1 CALIBRATION DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES (RÉGIME PERMANENT)**

Pour la modélisation, la recharge résultant de l'infiltration des eaux de pluie a été appliquée sur la totalité du territoire modélisé (l'aquifère des grès en l'occurrence) et fixée à la valeur de la recharge calculée par Leblanc (1994). Celui-ci avait estimé la recharge à une valeur de 230 mm/an pour l'année 1980 à partir de l'analyse des battements de la nappe observées à la station hydrologique de Boisville (Etang-du-Nord). Les eaux résultant des zones centrales de horst (par ruissellement de surface ou par écoulement souterrain) ont été imposées comme flux entrants dans les modèles, au niveau du contact de ces zones avec les terrains aquifères de la formation de Cap-aux-Meules. Ces flux tiennent compte de la surface des bassins versants.

Les débits de pompage des puits ont été extraits, lorsque disponibles au moment de la modélisation (automne 2003 et hiver 2004), de la base de données téléométriques Ohméga fournissant les volumes d'eau prélevés quotidiennement par chacun des captages municipaux. Selon l'exploitant, les débits moyens de prélèvement effectif (voir section 1.1.1) de l'année 2003 sont représentatifs des débits moyens des dernières années. Selon M. Jean Hubert, ing. de la Municipalité (mémo daté du 28 juillet 2004), les temps de pompage seraient comme suit : IHA : 13,4 à 15 h/jour, HAM : 13,6 à 14,4 h/jour et ICAM : 13,9 à 16,8 h/jour avec des pointe de 20 à 22 h/jour en juillet et août. Les débits moyens annuels représentatifs du prélèvement effectif par île intègrent les modalités d'exploitation avancées au mémo de M. Hubert.



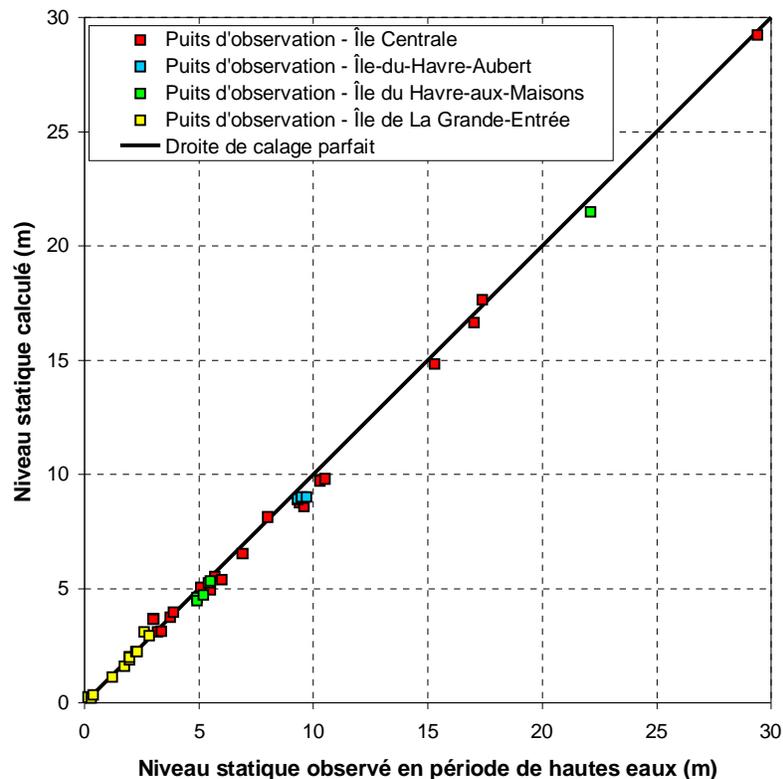
**Figure 9 : Conductivités hydrauliques calibrées par modélisation  
(a : Île de Cap-aux-Meules; b : Île de Havre-aux-Maisons;  
c : Île de Havre-Aubert; d : Île de La Grande-Entrée)**

La spatialisation des conductivités hydrauliques a été faite selon la cartographie géologique, en utilisant les moyennes géométriques par zone des valeurs obtenues des essais de pompage. Pour l'emmagasinement, le peu de valeurs disponibles et leur forte variabilité ont nécessité une calibration ultérieure de ce paramètre (voir section suivante traitant du régime transitoire).

L'île de Cap-aux-Meules est relativement bien documentée en termes de connaissances et de paramètres hydrogéologiques grâce au nombre et à la répartition des ouvrages. Pour l'île de La Grande-Entrée, les essais de pompage réalisés par Poulin (1977) fournissent également des informations pertinentes. Par contre, pour l'île de Havre-aux-Maisons et à plus forte raison pour l'île de Havre-Aubert, la faible répartition des points de mesure des paramètres rend plus hasardeuse les extrapolations spatiales des quelques valeurs connues de ceux-ci.

La piézométrie du régime permanent a pu être simulée pour les quatre îles. Les cartes piézométriques sont présentées dans les documents No 2 et 3 de ce rapport final. La

comparaison des niveaux statiques calculés avec ceux mesurés sur les puits d'observation montre un calage très satisfaisant (figure 10).



**Figure 10 : Comparaison des piézométries simulées et observées en régime permanent**

Par ailleurs, comme le montre la figure 11, les transmissivités calibrées pour le régime permanent sont relativement cohérentes avec les valeurs obtenues des essais de pompage. Seules les zones géologiquement complexes, telles les grès hétérogènes du membre de l'Etang-du-Nord (secteur de l'Etang-du-Nord ouest) et les versants de Fatima où la géophysique a révélé en profondeur la présence d'une structure en demi-horst (marches d'escalier), montrent des écarts plus importants. Les valeurs moyennes de ces deux zones ont par ailleurs été obtenues avec peu de points de mesure. Il est ainsi important de rappeler que les essais de pompage caractérisent une zone localisée autour du puits testé, qui n'est donc pas forcément représentative de toute la formation géologique dans laquelle celui-ci est situé. Ceci peut être d'autant plus vrai lorsque les mesures sont effectuées sur peu de points d'observation.

La modélisation réalisée avec ces valeurs de transmissivités a permis de simuler les écoulements d'eau souterraine dans les quatre îles concernées, d'évaluer leur capacité support et de déterminer les zones dans lesquelles des potentiels inexploités existent. Ces résultats seront présentés et discutés en détail dans les documents 2 et 3 de ce rapport final.

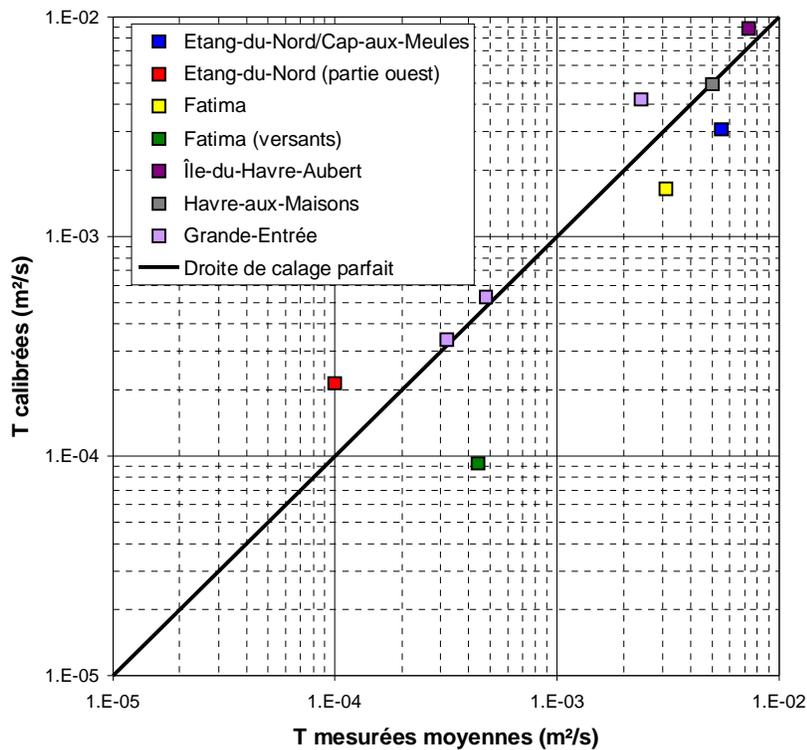


Figure 11 : Comparaison des transmissivités calibrées et mesurées

## 6.2 CALIBRATION DES COEFFICIENTS D'EMMAGASINEMENT (RÉGIME TRANSITOIRE)

Comme pour le régime permanent, la recharge utilisée pour le régime transitoire est basée sur celle évaluée par Leblanc (1994), en utilisant cette fois-ci les 12 valeurs mensuelles de l'année 1980 (figure 12). On remarque que cette recharge est importante à la fin de l'automne et au début du printemps (période de forte pluviométrie) et faible en saison estivale (période forte évapotranspiration) et hivernale (période de gel). Également, on observe un léger décalage (entre un et deux mois) entre les précipitations (pluie et neige tombant à la surface du sol) et la recharge (arrivant à la nappe).

Les chroniques de prélèvement des différents captages municipaux ont été fournies par la compilation des volumes journaliers de l'année 2003, archivés par le système Ohméga. On constate (figure 13) des prélèvements plus importants pour l'Île de Cap-aux-Meules que pour les deux autres îles du fait de sa population plus élevée. Les différences de consommation entre Havre-aux-Maisons et Havre-Aubert à plus faible population s'explique par l'importante activité industrielle de la pêche présente sur cette dernière. Les prélèvements sont partout plus importants lors de la saison estivale à fort afflux touristique, mais montrent également des taux significatifs en février-mars 2003 du fait des bris d'aqueduc de cette année-là. Il est également possible que certains usagers laissent couler certains de leurs robinets durant les périodes de grand froid afin d'éviter que leur canalisation ne gèle. Cette pratique est reconnue par plusieurs personnes.

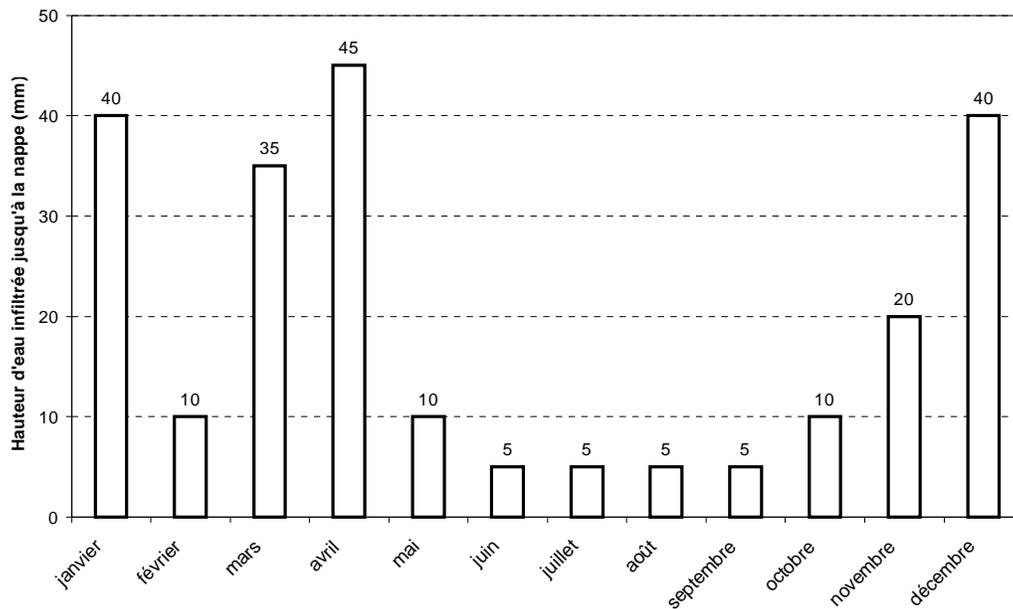


Figure 12 : Recharges mensuelles de l'année 1980 selon Leblanc (1994)

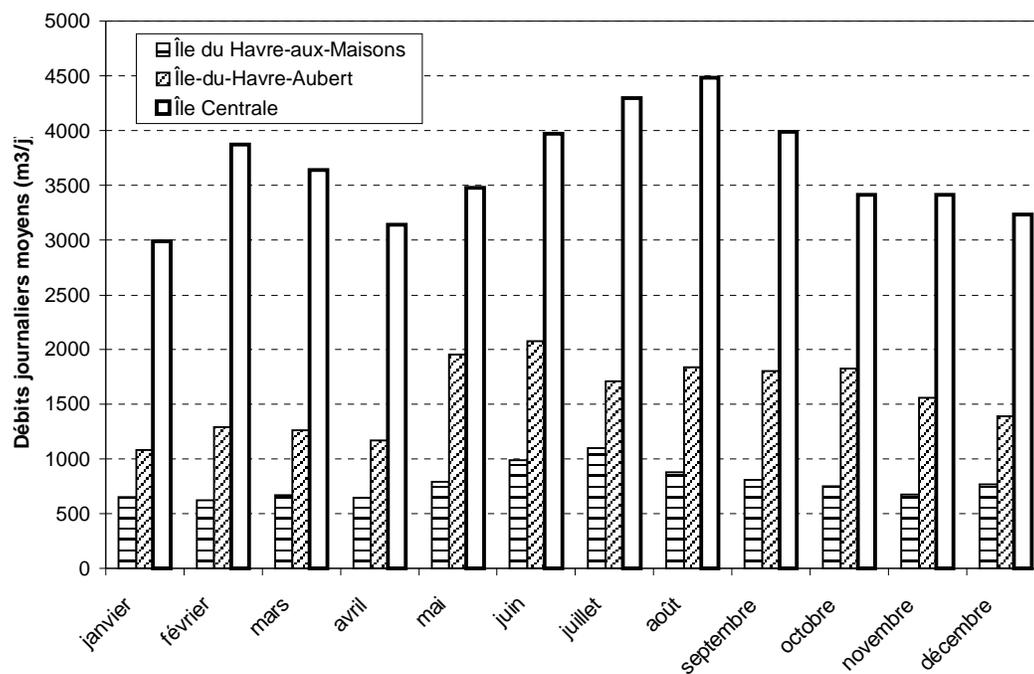


Figure 13 : Prélèvements mensuels des captages municipaux en 2003

Pour la calibration du régime transitoire, les chroniques historiques des niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation du Ministère de l'Environnement ont été utilisées. Ces chroniques, longues de plusieurs années, ont été découpées en autant de courbes annuelles que d'années de suivi. La calibration du modèle sur les données historiques vise à ajuster la valeur des

coefficients d'emmagasinement utilisés (également appelés porosité efficace dans le cas des nappes libres).

Les valeurs des coefficients d'emmagasinement obtenus des essais de pompage n'ont pas permis de simuler de façon adéquate les courbes annuelles historiques. Des valeurs de 6 à 16 % pour le membre de l'Etang-des-Caps et de 2 à 7 % pour le membre de l'Etang-du-Nord ont été nécessaires pour reproduire adéquatement le comportement moyen. Comme le montre la figure 14, les fluctuations piézométriques ainsi simulées sont cohérentes avec les courbes annuelles historiques. Les répartitions spatiales utilisées coïncident avec les zones de transmissivité définies lors du calage en régime permanent, confirmant la distribution des paramètres selon les unités géologiques.

Les valeurs d'emmagasinement utilisées pour reproduire les fluctuations piézométriques annuelles observées se rapprochent des valeurs de porosité reconnues pour les grès des îles. Ceci signifierait donc que les valeurs d'emmagasinement obtenues durant les essais de pompage représenteraient l'importance de ce paramètre sur le court terme, alors que les valeurs nécessaires aux calages des courbes annuelles correspondraient à des valeurs de ce paramètre sur le plus long terme, plus représentatives alors de la porosité totale.

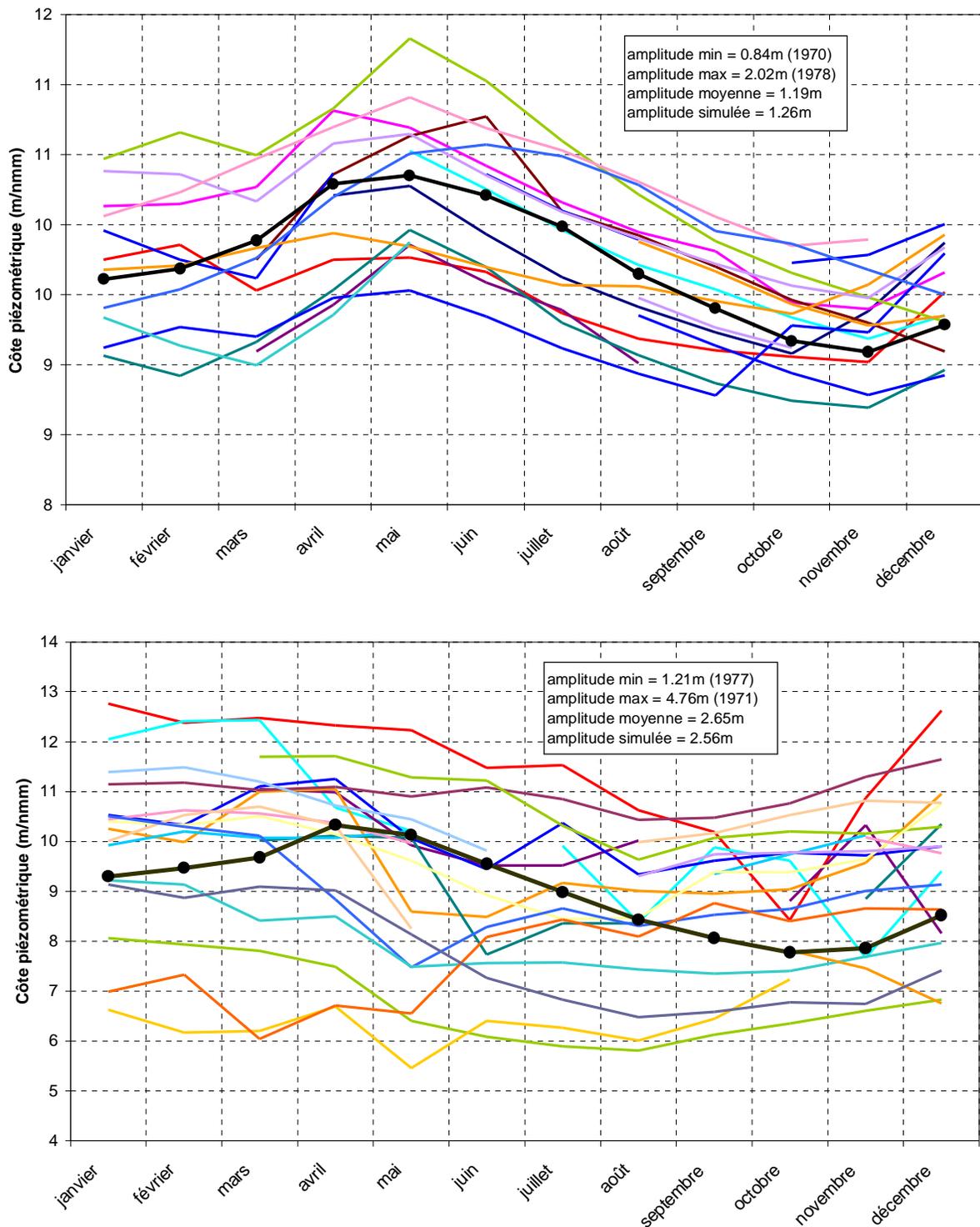
### 6.3 CALIBRATION DES POROSITÉS CINÉMATIQUES (VITESSES D'ÉCOULEMENT)

La vitesse réelle d'écoulement de l'eau dans le milieu aquifère dépend directement de la porosité cinématique. Les vitesses d'écoulement ayant pu être déterminées avec précision sur plusieurs profils géophysiques, la modélisation a permis d'en déterminer la porosité cinématique dans les différents systèmes aquifères. Le tableau 8 récapitule les vitesses d'écoulement mesurées et les porosités cinématiques en résultant, telles que calibrées par la modélisation.

Île	Profil géoelectrique (#)	Secteur	Vitesse de dérive des anomalies géophysiques (m/an)	Porosité cinématique	
				(%)	moyenne
Île Centrale	CAMPU30c	Fatima	200	2.5	2.0
	CAMP3c	Etang-du-Nord	180	2.0	
	CAMPU9a	Cap-aux-Meules	270	2.0	
	CAMvide	Les Caps	170	1.5	
Havre-Aubert	HAP1P2	La Montagne	200	1.0	1.0
Havre-aux-Maisons	HAMP4	Dune du Sud	230	1.0	1.0

**Tableau 8 : Vitesses d'écoulement et porosités cinématiques obtenues par géophysique**

La porosité cinématique est un paramètre nécessaire à la détermination des vitesses d'écoulement, des temps de séjour (isochrones) et donc des périmètres de protection. En conséquence, les différents périmètres de protection des captages municipaux, qui tiennent compte de leurs interactions mutuelles, peuvent être déterminés à l'aide de la modélisation avec MODFLOW.

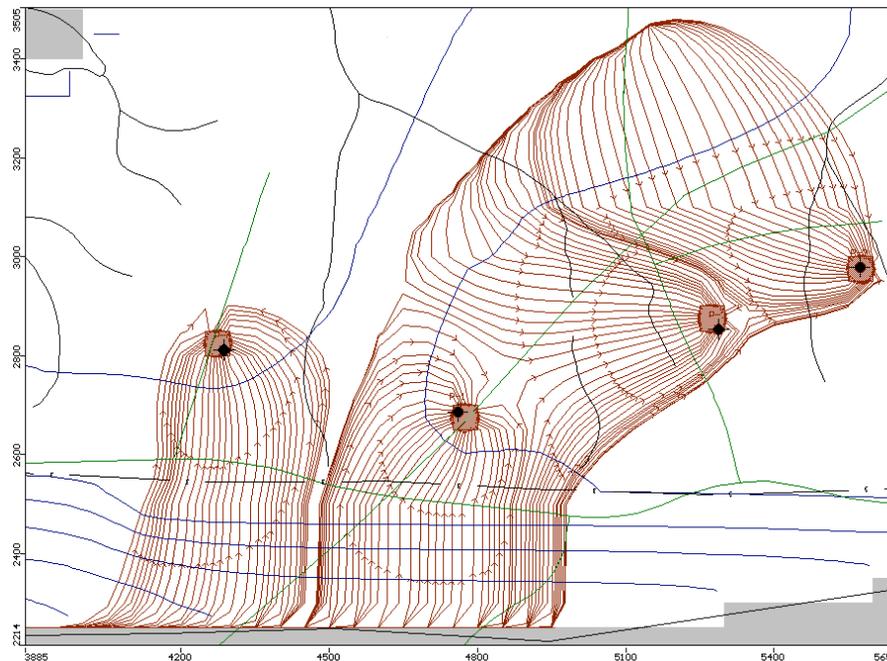


**Figure 14 : Comparaison des niveaux mensuels simulés et mesurés**  
**(a : piézomètre Boisville sur l'Île de Cap-aux-Meules – années 1968 à 1985**  
**b : piézomètre Vigneau sur l'Île-de-Havre-Aubert – années 1970 à 1991)**

## 6.4 APPLICATION À LA DÉTERMINATION DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION

Un des résultats les plus importants et les plus attendus de la modélisation concerne le tracé des lignes d'écoulement de la nappe phréatique et la détermination des périmètres de protection. L'ensemble des lignes d'écoulement qui convergent vers le puits de pompage génère un domaine géographique correspondant à l'aire d'alimentation du captage (figure 15). Dans cette zone, toute goutte de pluie et tout contaminant dissous qui s'infiltré jusqu'à la nappe atteindra tôt ou tard le puits.

Pour chaque point d'une ligne donnée, on peut calculer le temps nécessaire pour que l'eau arrive jusqu'au puits. Ceci signifie que, sur chaque ligne d'écoulement, on peut donc localiser la position correspondant à un délai donné nécessaire pour arriver au puits. Pour l'ensemble des lignes d'écoulement, ces points de même délai définissent l'isochrone correspondante. Dans le cas des périmètres de protections bactériologique et virologique, les isochrones d'arrivée au puits sont respectivement définies par des temps de migration de 200 et 550 jours. En reliant les marqueurs de 200 jours et ceux de 550 jours de chaque ligne d'écoulement (figure 15), on obtient respectivement les périmètres de protection bactériologique et virologique.



**Figure 15 : Lignes d'écoulement et marqueurs 200 et 550 jours (Havre-aux-Maisons)**

Ces périmètres ont été numérisés et intégrés dans le système d'informations géographiques (SIG) de la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Ils peuvent être superposés à n'importe laquelle des couches d'information disponibles dans la base de données du SIG, tel que les cartes d'inventaires des sources potentielles de contamination (voir sections concernées des documents 2 et 3 de ce rapport final). De telles cartes sont particulièrement pertinentes pour orienter les décisions futures d'aménagement du territoire et mettre en application la réglementation spécifique à ces zones de protection.

## 7 MODÉLISATION DES BISEAUX SALÉS ET DES INTRUSIONS SALINES (SUTRA)

Un second type de modélisation a été spécifiquement réalisé pour la simulation du biseau salé et des intrusions salines occasionnées par l'exploitation des captages municipaux. Pour cela, le modèle SUTRA 3D a été utilisé car ce modèle permet une simulation des écoulements d'eau prenant en compte les effets densitaires (liés aux concentrations de sel). Il est ainsi possible de simuler la position du biseau salé sous différentes conditions de recharge et de prélèvement. C'est donc un outil particulièrement pertinent pour le contexte d'étude des îles.

### 7.1 PRINCIPE DE SIMULATION DES ÉCOULEMENTS DENSITAIRES

Une première approche de modélisation de l'interface eau douce / eau salée consiste à considérer l'eau douce et l'eau de mer comme deux fluides non miscibles, approche qui n'est valable qu'en régime statique permanent. L'interface y est considéré comme une couche très fine, sans mélange important entre les deux fluides. Dans cette approximation, l'équilibre entre l'eau douce de la nappe et l'eau de mer salée est régie par le principe statique de l'isostasie, régissant de la même façon la flottaison d'un iceberg sur l'océan ou celle d'un morceau de bois. Cet équilibre est régi par le principe d'Archimède. La relation mathématique de Ghyben-Herzberg précise que l'interface entre l'eau douce et l'eau salé est localisé à une profondeur égale à environ 40 fois la hauteur d'eau douce présente au-dessus du niveau de la mer (c'est-à-dire à 40 fois la hauteur piézométrique). L'interface forme donc un biseau qui s'enfonce vers l'intérieur des terres avec une pente beaucoup plus élevée que celle de la surface de la nappe d'eau douce. La figure 16 illustre schématiquement ce principe dans le cas d'un milieu insulaire (océan de part et d'autre des terres). La nappe phréatique forme dans ce cas une lentille flottant sur l'eau salée.

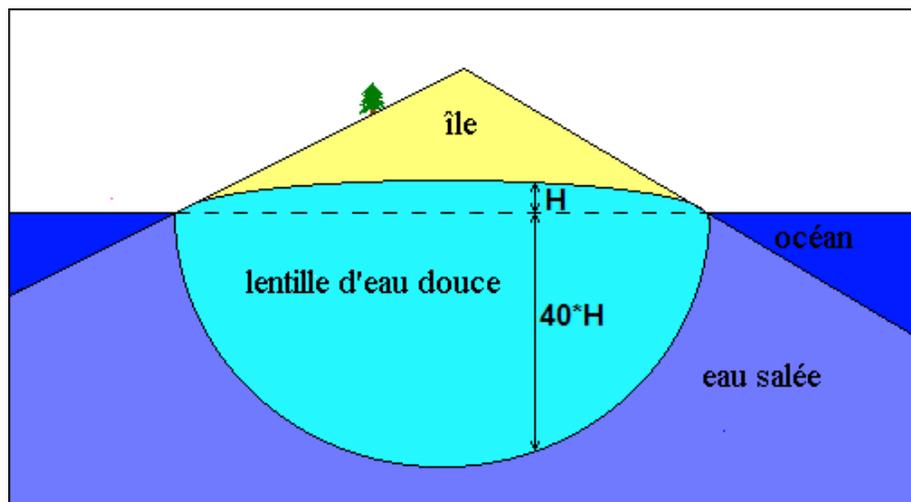


Figure 16 : Équilibre entre eau douce et eau salée selon Ghyben-Herzberg

La deuxième approche considère l'eau douce et l'eau de mer comme miscibles, ce qui est une réalité physique. En régime transitoire, l'équilibre entre les deux fluides est donc régi à la fois par les mécanismes de diffusion et de mélange de l'eau salée dans l'eau douce, et par le

mécanisme d'écoulement de l'eau douce vers l'eau salée qui peut s'opposer ou amplifier le premier. L'interface eau douce / eau salée n'est plus une couche fine comme avec Ghyben-Herzberg, mais forme une zone de transition d'épaisseur variable suivant les variations des conditions d'écoulement. Les équations mathématiques qui régissent cet équilibre, dénommées de manière générale « lois d'écoulements densitaires », sont relativement complexes. SUTRA, un modèle en éléments finis, intègre ces équations et permet donc de procéder à des simulations de l'interface en deux ou trois dimensions, en régime permanent ou transitoire. Les résultats exposés par la suite ont été obtenus par l'utilisation de ce modèle.

## 7.2 CONSÉQUENCE D'UNE AUGMENTATION DES DÉBITS ACTUELS

Les simulations ont consisté à simuler différents contextes de prélèvement par pompage pour les conditions hydrogéologiques connues. Les données d'entrée des modèles sont globalement semblables à celles utilisées pour les modélisations avec MODFLOW. La simulation étant faite en régime permanent, la recharge et les débits de chacun des puits sont les valeurs annuelles moyennes. Les résultats montrent l'état d'équilibre relié au niveau actuel de pompage et ceux reliés à des niveaux de pompage plus élevés. Les recommandations peuvent alors être faites quant aux niveaux de pompage requis pour ne pas déstabiliser l'équilibre de l'interface eau douce / eau salée. Pour cette modélisation, quatre secteurs ont été simulés : Cap-aux-Meules – Etang-du-Nord, Fatima, Havre-aux-Maisons et Havre-Aubert.

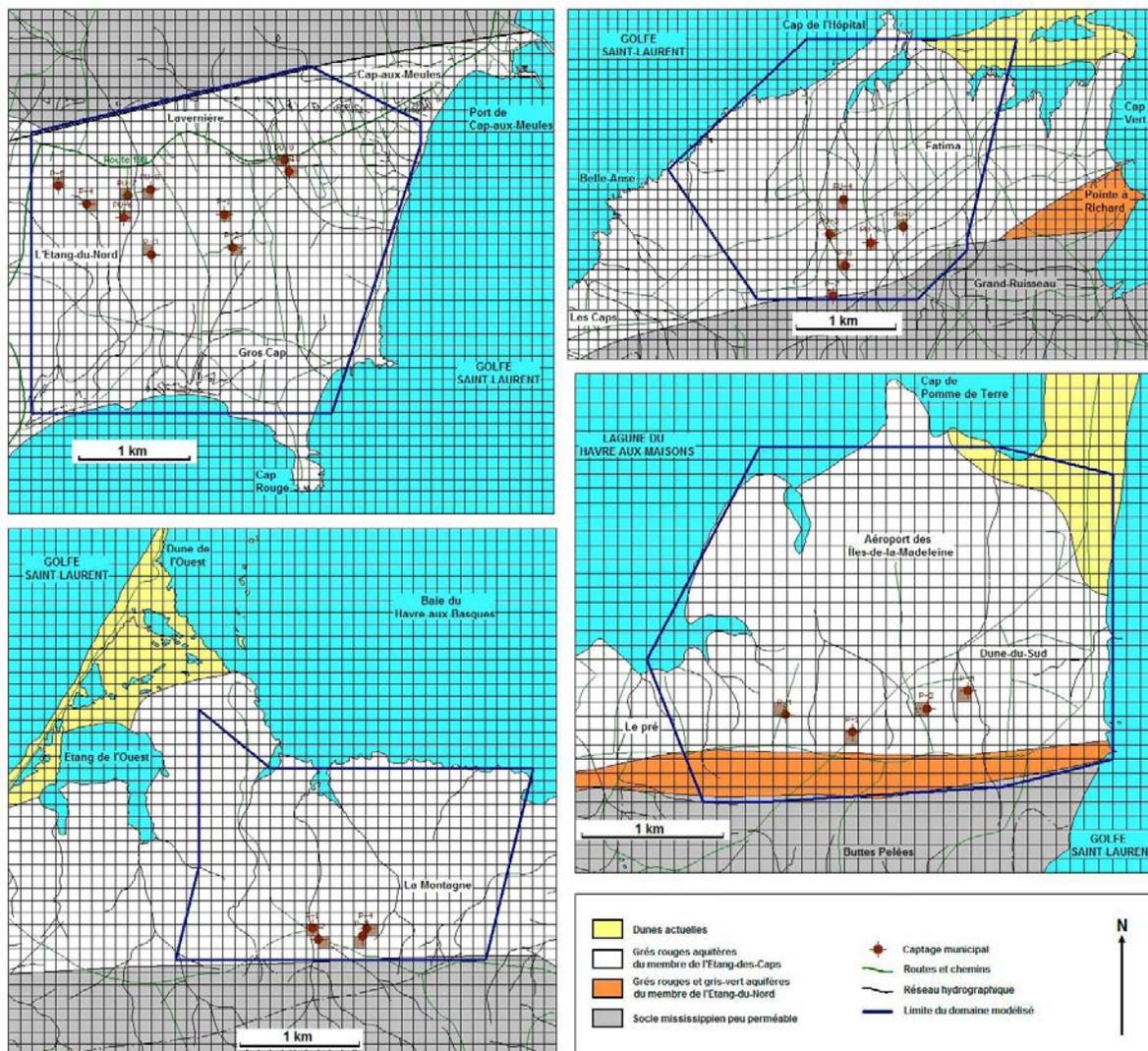
La figure 17 présente les secteurs modélisés, les figures 18 à 20 illustrant la représentation 3D des résultats obtenus pour les différents scénarios de prélèvement simulés. Les discussions détaillées des résultats spécifiques à chaque île sont exposées dans les documents 2 et 3 de ce présent rapport.

De manière générale, il apparaît que le régime actuel de prélèvement moyen (année 2003), c'est-à-dire un fonctionnement quotidien des puits à leur débit de balancement pendant environ 10 heures, n'induit pas d'intrusion saline, dans aucun des secteurs simulés. Le doublement de ces débits annuels moyens, ce qui correspondrait globalement à un régime de pompage estival soutenu (20 à 24 heures de fonctionnement des captages par jour), déstabiliserait cet équilibre et provoquerait à terme des remontées salines au droit de certains puits. Ce serait le cas des champs captants de l'Etang-du-Nord – Cap-aux-Meules et de Fatima où des remontées saumâtres ont par ailleurs été observées par la géophysique. Il faudrait tripler ces débits moyens pour observer le même phénomène à l'Île-de-Havre-Aubert (secteur de La Montagne) et les quintupler pour le champ captant de Havre-aux-Maisons. Notons également que la configuration spatiale des champs captants a une influence très importante sur la mise en place de ces intrusions. En effet, c'est au niveau des puits implantés en aval d'autres puits (donc dans leur ombre hydraulique) que se produisent les premières remontées.

En d'autres termes, les débits moyens annuels de prélèvement effectif (année de référence 2003), lesquels intègrent les modalités d'exploitation des puits par île (voir section 6.1), ne doivent en aucun cas être augmentés. Compte tenu de la difficulté d'appréciation de ces débits moyens, un suivi précis des débits de balancement et des modalités d'exploitation de chaque captage municipal doit être impérativement réalisée. Ce suivi précis passe par la maîtrise du système Ohméga (voir section 2.2.3.). La conséquence d'une telle analyse favorisera éventuellement une réorganisation des modalités d'exploitation des captages municipaux (débit de balancement / temps de pompage par jour). En particulier, pour la même quantité

quotidienne d'eau prélevée, l'application d'un faible débit en continu sur la journée est beaucoup moins préjudiciable pour la ressource qu'un débit élevé sur une courte durée. En effet, le premier a tendance à intercepter l'écoulement naturel de la nappe, à la manière d'un écrémage, alors que le second mobilise l'eau verticalement et peut donc provoquer une remontée saline.

Finalement, un développement supplémentaire de la ressource en eau ne peut passer que par l'implantation de nouveaux puits judicieusement répartis et dans des secteurs actuellement inexploités. Le principe directeur de ces implantations devra être une distribution transversale aux lignes d'écoulement et non une distribution longitudinale des puits comme ce fût le cas pour certains puits dans le passé. Les recommandations spécifiques à chaque champ captant sont exposées dans les sections respectives de chaque île (documents 2 et 3 du présent rapport).



**Figure 17 : Secteurs modélisés avec SUTRA**  
(a : Etang-du-Nord/Cap-aux-Meules; b : Fatima;  
c : Île-de-Havre-Aubert; d : Havre-aux-Maisons)

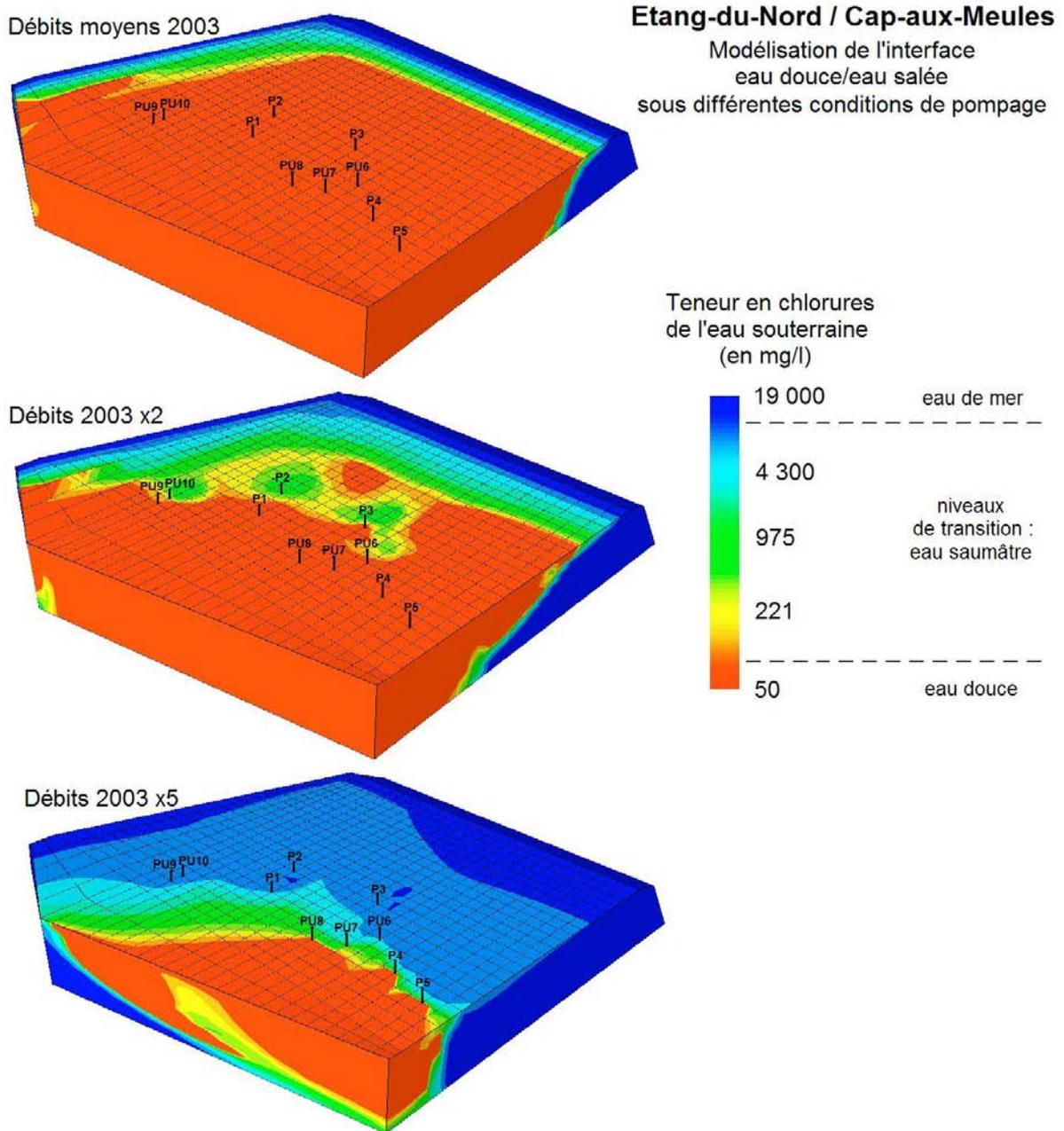


Figure 18 : Modélisation des intrusions salines pour Etang-du-Nord – Cap-aux-Meules

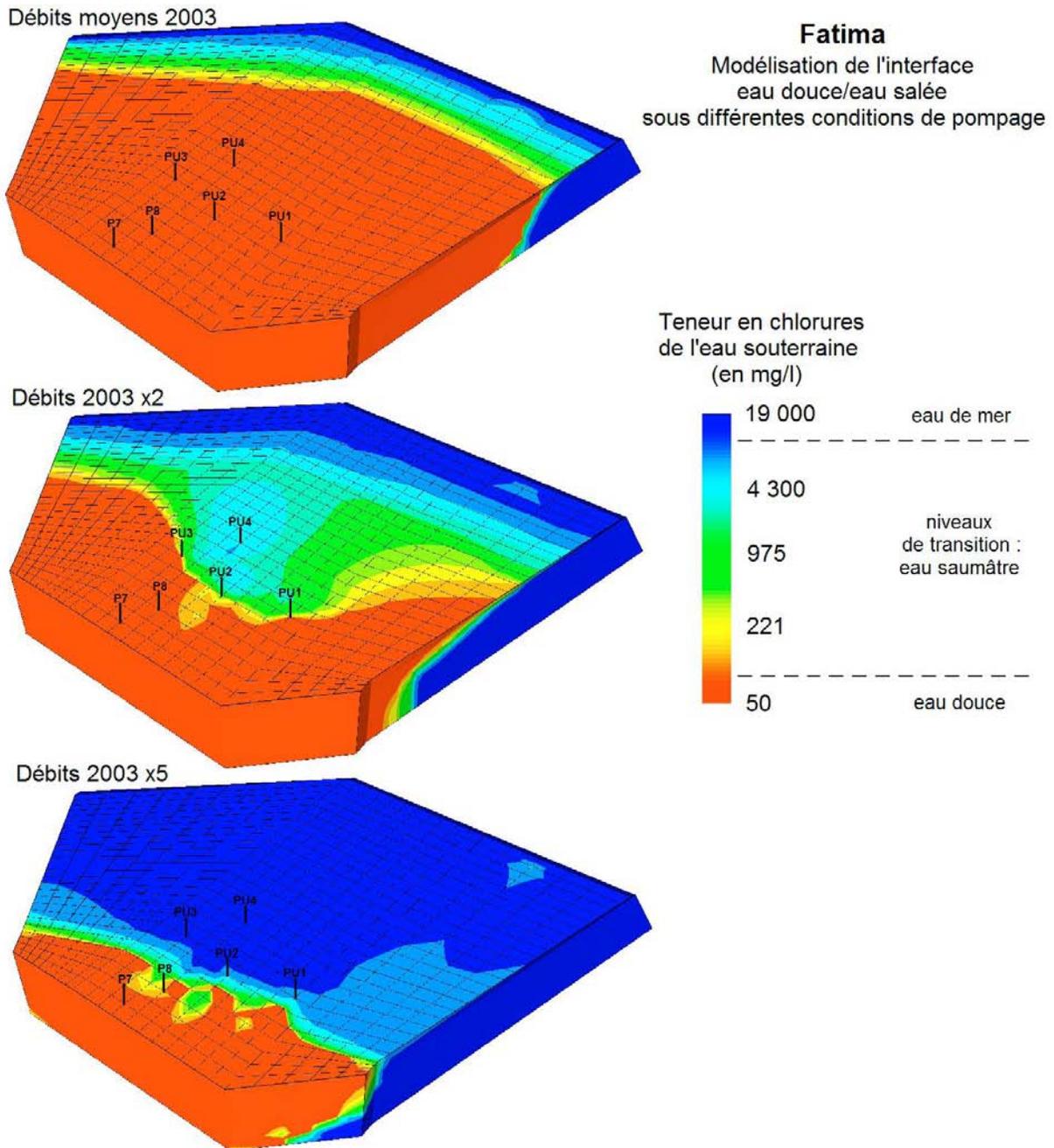


Figure 19 : Modélisation des intrusions salines pour Fatima

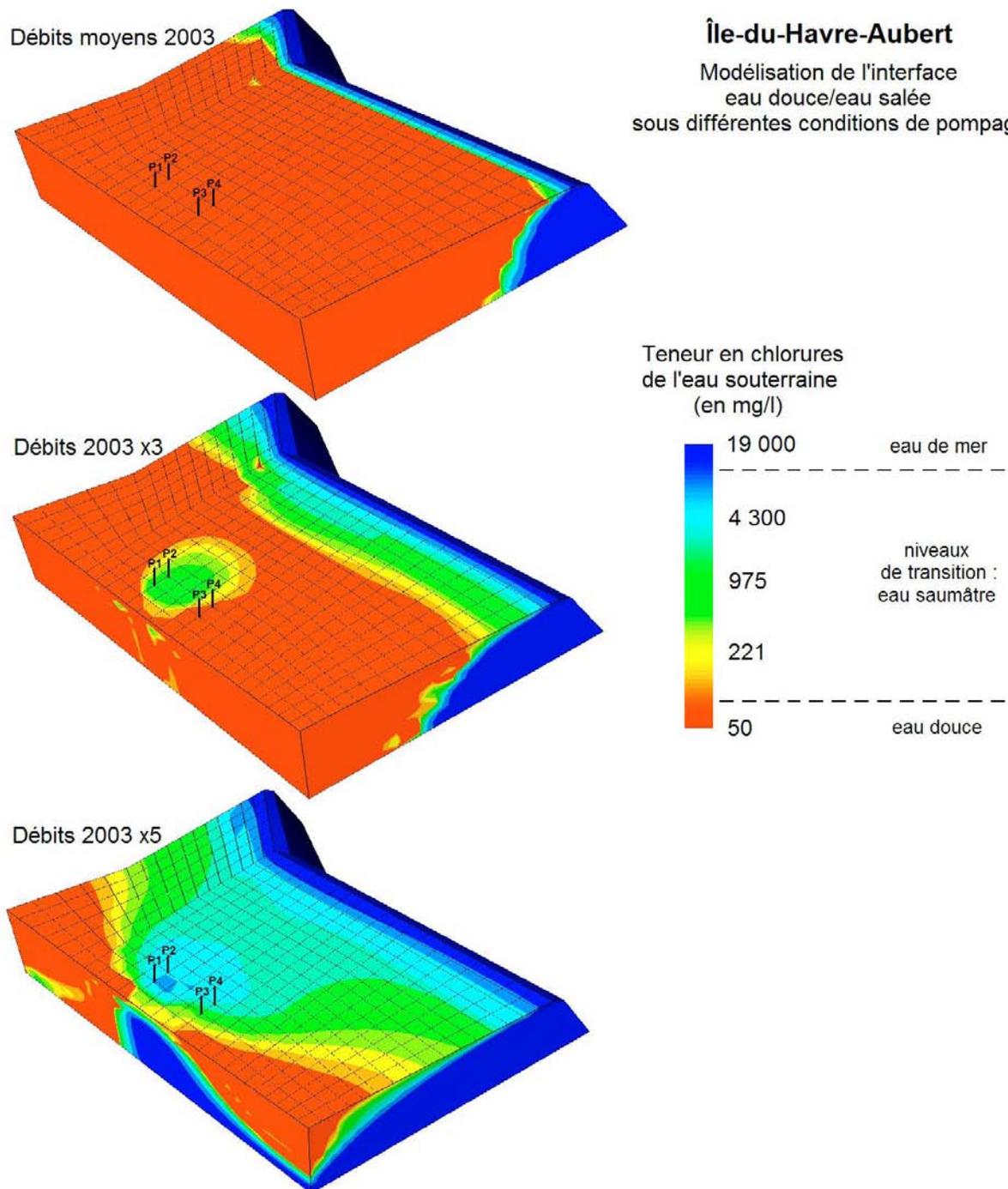


Figure 20 : Modélisation des intrusions salines pour l'Île-du-Havre-Aubert

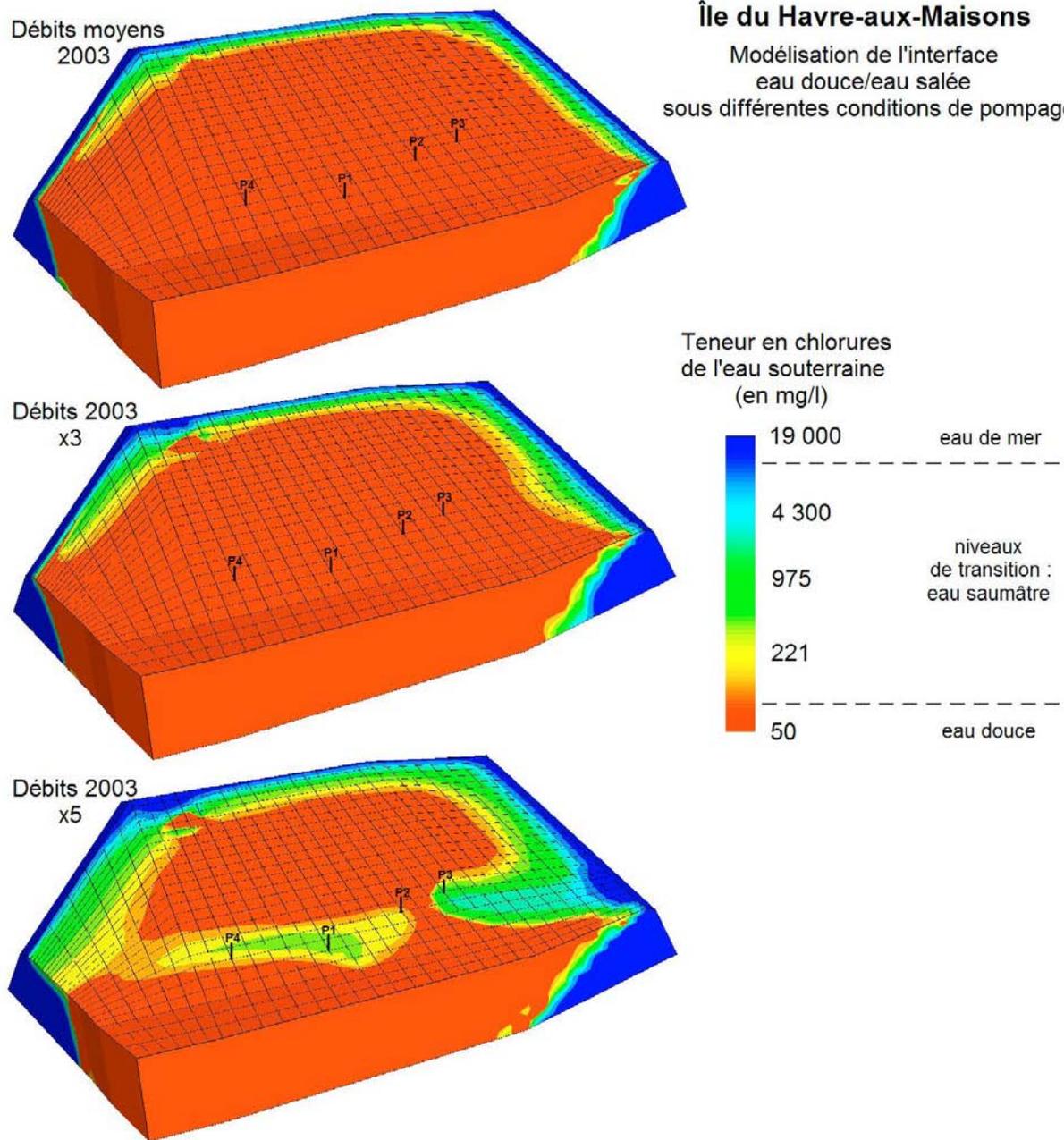


Figure 21 : Modélisation des intrusions salines pour l'Île de Havre-aux-Maisons

## 8 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

Dans le cadre des activités réalisées de 2002 à 2004, Madelin'Eau a pu :

- q revoir et analyser les informations disponibles;
- q procéder à l'inventaire de 223 puits privés dont un bon nombre (129) sont encore utilisés dans les îles desservies par un réseau d'aqueduc;
- q réaliser 25 essais de pompage sur les captages municipaux existants;
- q réaliser 32 kilomètres de levés géophysiques;
- q prélever 81 échantillons d'eau souterraine à partir des puits privés inventoriés en 2002 et répartis sur des îles non desservies par un réseau d'aqueduc;
- q modéliser les écoulements des eaux souterraines sur les îles desservies par des réseaux d'aqueduc et sur l'Île de La Grande-Entrée;
- q procéder à la délimitation de l'aire d'alimentation de chacun des captages municipaux existants et des périmètres de protection bactériologique et virologique qui y sont associés;
- q procéder à l'inventaire des activités à risques dans l'aire d'alimentation de chacun des captages municipaux;
- q simuler l'évolution du biseau salé et des intrusions salines induites par l'exploitation des captages municipaux sous certaines conditions d'exploitation;
- q consolider la base de données géo-référencées exploitée par la municipalité en ajoutant notamment des niveaux d'information géologiques, pédologiques, géophysiques et hydrogéologiques;
- q former le géomaticien de la municipalité à l'exploitation hydrogéologique de cette base de données.

Suite à cette démarche, Madelin'Eau conclut à la nécessité de consolider l'effort de gestion et de valorisation des ressources en eau souterraine initié en 2002 et 2003. Pour ce faire, la Municipalité devra :

- 1) optimiser et valoriser l'instrumentation Ohméga installée sur la presque totalité des captages municipaux;
- 2) poursuivre la caractérisation des ressources en eau souterraine;
- 3) gérer les ressources en eau souterraine disponibles;
- 4) valoriser les secteurs d'intérêt hydrogéologique identifiés dans les documents 2 et 3.

Dans le cadre de la recommandation no 1 (système Ohméga), il faut :

- q mette en œuvre le système Ohméga sur les deux puits municipaux non équipés;
- q ajuster et calibrer de façon cyclique, l'instrumentation Ohméga installée en vue de suivre avec précision les mesures de niveaux d'eau et de débits dans chaque puits municipal;
- q archiver les données chronologiques (niveaux d'eau et débits);
- q développer les algorithmes nécessaires permettant de visualiser instantanément les fluctuations piézométriques (sous forme de graphiques temporels);
- q Nivelier tous les points de références supportant les mesures de niveaux d'eau dans chaque puits municipal;
- q adopter une terminologie descriptive des débits appliqués aux puits qui soit unique et adaptée aux préoccupations de gestion et exploitation;

- q déterminer avec précisions les modalités d'exploitation des puits municipaux qui prévalent à ce jour (débit réel, temps de pompage par jour, etc.) par la tenue d'un registre informatique permettant d'établir par puits des graphiques temporels.

Dans le cadre de la recommandation no 2 (caractérisation des ressources disponibles), il faut :

- q prélever semi-annuellement à la sortie de chacun des puits municipaux les eaux brutes (avant distribution dans le réseau) en vue de suivre les impacts d'origine naturelle (chlorures) et anthropique (azote, analyses bactériologiques et virales);
- q identifier sur l'archipel des forages qui pourraient être utilisés dans le cadre d'un suivi régulier des fluctuations de nappe;
- q procéder à l'aménagement de puits d'observation aux endroits non influencés par des pompes municipales (c'est à dire reprendre en quelque sorte le réseau piézométrique opéré par le MENV jusqu'aux milieux des années '90);
- q suivre hebdomadairement le réseau de forages (piézomètres) préalablement identifié;
- q ré-échantillonner les puits privés ayant montré un dépassement normatif par rapport aux nitrates-nitrites;
- q inspecter les installations septiques en particulier là où des concentrations élevées en nitrates-nitrites ont été détectées en 2003;
- q exiger de toute compagnie de forage travaillant sur le territoire de la municipalité qu'elle détienne la licence d'entrepreneur en puits foré émis par la Régie du Bâtiment du Québec et, surtout, que l'hydrogéologue de terrain établisse avec précision la coupe géologique et technique de chaque nouveau forage;
- q mettre sur pied une gestion des ouvrages de captage individuels en association avec les articles 21 et 40 du RCES (permis de forage émis par la municipalité, analyses d'eau , compilation des rapports de forage et analyses d'eau, etc.).

Dans le cadre de la recommandation no 3 (gestion des ressources disponibles), il faut :

- q plafonner les modalités d'exploitation des captages municipaux à celles qui prévalent à ce jour;
- q préparer par secteur géographique où se trouvent des captages municipaux, les cartes de localisation des périmètres de protection bactériologique et virologique;
- q établir par puits concerné une fiche signalétique dressant l'inventaire des sources potentielles de contamination susceptibles d'avoir un impact sur la ressource en eau souterraine ou encore des activités à risque de contamination;
- q former et sensibiliser les résidents des différents secteurs concernés à la fragilité de la ressource en eau souterraine;
- q énoncer une politique municipale visant à protéger les ressources en eau souterraine au droit de ces périmètres de protection;
- q interdire l'aménagement des futurs puits privés dans les résidences.

Dans le cadre de la recommandation no 4 (valorisation des ressources disponibles), il faut :

- q ajouter aux schémas d'aménagement du territoire les secteurs d'intérêts hydrogéologiques (voir documents 2 et 3), en vue de protéger (réserver) ces secteurs pour l'aménagement de nouveaux captages municipaux (le cas échéant);
- q dresser l'inventaire des sources de contamination ou des activités à risque dans ces secteurs d'intérêt hydrogéologique.

## 9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Groupe Madelin'Eau, mars 2003 - Gestion des eaux souterraines aux îles-de-la-Madeleine - Un défi de développement durable - Rapport d'étape no 1 couvrant la période d'avril 2002 à mars 2003, pour le compte de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

Groupe Madelin'Eau, décembre 2004 - Gestion des eaux souterraines aux îles-de-la-Madeleine - Un défi de développement durable - Rapport final :

- q Document no 1 – Méthodologie de l'étude;
- q Document no 2 – Activités et résultats concernant l'Île de Cap-aux-Meules,
- q Document no 3 – Activités et résultats concernant les autres îles habitées de l'archipel.

Outre la documentation produite par Madelin'Eau, le projet a pu accéder à une vaste documentation. La documentation retracée par Madelin'Eau a été classée par île et par source. La liste bibliographique détaillée apparaît dans le détail au rapport d'activité no 1, mars 2003, annexe 1. Cependant, apparaît ci-après une sélection de documents hydrogéologiques à caractères régionaux ou réglementaires.

Bilodeau D. août 1995 – Définition de débits sécuritaires au droit des puits de production P1 et P2. Municipalité de Havre-Aubert, Îles-de-la-Madeleine. Annexe C du rapport BPR : M69-95-23, août 1995.

Bilodeau D. août 1998 – Municipalité de l'Île du Havre-Aubert. Étude hydrogéologique - Pour BPR ingénieur conseils.

BPR, mars 1993 – Régie d'eau potable de l'Île de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine. Construction et essai de 8 puits de production – Cahier des devis. Réf : M69-90-09. (Section 5 : plan et détails).

BPR, septembre 1993 – Construction et essais de huit puits de production d'eau potable sur l'Île de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine, préparé par Donat Bilodeau, ing.

BPR, août 1995 – Municipalité de l'île du Havre-Aubert – Alimentation en eau potable – Étude préliminaire, Notre référence M69-95-23.

Brisebois, D., 1981 – Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale des énergies conventionnelles, Service de l'exploration, DPV- 796.

Bureau M. juin 1995 – Localisation des interfaces eau douce-eau saumâtre-eau salée par méthodes géophysiques aux puits de captage Vigneau de Havre-Aubert (G4165-01-01-01010), Annexe D du rapport BPR : M69-95-23, août 1995.

CIDEQ, 27 mai 1974 – Programme de développement de nappes d'eau souterraine à Lavernière, Étang-du-Nord, Fatima (8 piézomètres et 3 puits exploratoires) (G4165-01-01-01015).

CIDEQ, 11 décembre 1975 – Rapport sur l'expertise de forages et de pompages aux Îles-de-la-Madeleine pour les municipalités de Fatima, Étang-du-Nord (5 forages : 5/75 à 9/75) (G4165-01-01-01015).

CIDEQ, 14 janvier 1976 – Îles-de-la-Madeleine – Alimentation en eau des municipalités de Fatima et Étang-du-Nord – Étude hydrogéologique – Résultats d'analyses chimiques sur les forages 5/75 à 9/75 (G4165-01-01-01015)

Dessureault D. 22 novembre 1966 – Rapport No 658-A, 5p, 1 carte (G4165-01-01-01015) – Projet ARDA 765 – Aperçu des travaux sur les recherches en eau souterraine aux îles-de-la-Madeleine, comté des îles-de-la-Madeleine.

Dessureault R. et G Simard, 1970 – Hydrogéologie des Îles de la Madeleine, Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, Direction générale des Mines, service de l'hydrogéologie, H.G. -1, 95 p.

Géoterrex Itée, 1971 – Étude hydrogéologique par sondage électrique des Îles-de-la-Madeleine par P. Gilliland, Étude 85-158.

Géoterrex Itée, 1976 – Étude hydrogéologique complémentaire par sondages électriques Îles-de-la-Madeleine par G. Omnès, Etude 85-724.

Leblanc Y. Août 1994 – Analyse et modélisation numérique de huit puits de production sur l'Île du Cap-aux-Meules, îles-de-la-Madeleine – Essai de maîtrise présenté à Pierre Gélinas et Denis Isabel, Université Laval.

MENV/Région Gaspésie, 11 avril 1994 – Autorisation de 8 nouveaux puits, l'Île de-Cap-aux-Meules. N/Réf : 7321-11-01-0387400-1077048.

MENV/Région Québec, 18 septembre 1995 – Autorisation (Article 32) – Intégration du réseau d'aqueduc – Le lot n 5 (PU1, PU8, PU9, PU10). N/Réf : 7321-11-01-0387401-1115752.

MENV/Région Gaspésie, 23 juillet 1997 – Demande d'expertise technique sur l'état de la nappe phréatique. N/Réf : 7311-11-01-0118009.

MENV/Québec, 4 août 1997 – Demande d'expertise technique de la part de la direction régionale de la Gaspésie, Îles-de-la-Madeleine, pour la construction d'un ouvrage de captage d'eau souterraine par la municipalité de l'Île-du-Havre-Aubert. Réf : 7311-11-01-0118009.

MENV, 8 septembre 1997 – Autorisation (Article 22). Construction d'un puits et modification des deux puits existants. N/Réf : 7311-11-01-0118009-1107595.

MENV, Qc, 11 avril 2001 – Madelimer inc. (Grande Entrée) – Certificat d'autorisation (article 22) – Exploitation d'une usine de transformation de produits marins.

Ouellet M. 18 mars 1993 – Implantation de nouveaux puits (Cap-aux-Meules) aux Îles-de-la-Madeleine. (Note de service).

Ouellet M. 26 mai 1993 – Recherche en eau sur l'Île-du-Cap-aux-Meules – Note de service – Référence au rapport D. Bilodeau (1993) G-4165-01-01300).

Ouellet M. 5 octobre 1993 – Construction de nouveaux puits par la Régie intermunicipale d'approvisionnement en eau potable de l'Île de Cap-aux-Meules (REPIC) – Note de service (G4165-01-01 REPIC).

Ouellet M. 11 octobre 1994 – Étude hydrogéologique aux îles-de-la-Madeleine, Position technique du MENV (G4165-01-01-01020).

Poulin M. 1977 – Etude hydrogéologique des Îles de Grosse et de Grande Entrée, Îles-de-la-Madeleine. Service technique en eau souterraine inc. (dec 1977).

Simard G., 1974 – Rapports de datation des eaux souterraines du Havre-aux-Maisons et du Cap-aux-Meules (Teledynes Isotopes).

Sylvestre M. 13 septembre 1973 – Compte rendu de travaux aux Îles-de-la-Madeleine, comté des îles-de-la-Madeleine, Rapport No 680-A, 4 p. (G4165-01-01-01015) – Secteur de Grande-Entrée.

Sylvestre M. 2 octobre 1974 – Municipalité de Fatima – Approvisionnement en eau douce (G4165-01-01-01020).

Sylvestre, M., 1974 – A finite element model for salt water upconing and its application to the Madgalen Islands aquifer, thèse pour M. Sc., Université de Waterloo.

Sylvestre M. 4 mars 1976 – Projet d'études aux îles-de-la-Madeleine pour réaliser un relevé géophysique auprès des cinq (5) principaux centres de pompage aux îles-de-la-Madeleine afin d'y localiser l'interface eau douce/eau salée.

Sylvestre M. 1979, Carte hydrogéologique des îles de la Madeleine, O-48.

Sylvestre M. 1979 – Étude par modèle mathématique des nappes souterraines de la grosse île et de l'Île de la Grande Entrée, îles-de-la-Madeleine, Service des eaux souterraines, H.G. 12.

Sylvestre M. et J.-M. Boucher, avril 1985 – Eau potable aux Îles-de-la-Madeleine – Problématique – Situation et propositions, 17 p.

Sylvestre M. 4 octobre 1985 – Rapport 1429 Eaux Souterraines – Avis technique concernant un site de disposition de déchets solides sur la Dune du Nord proposé par la M.R.C. des îles-de-la-Madeleine, 3 p.

Tardif L., 1967 – Pédologie des îles-de-la-Madeleine, Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Québec, Division des Sols, Service de la Recherche.