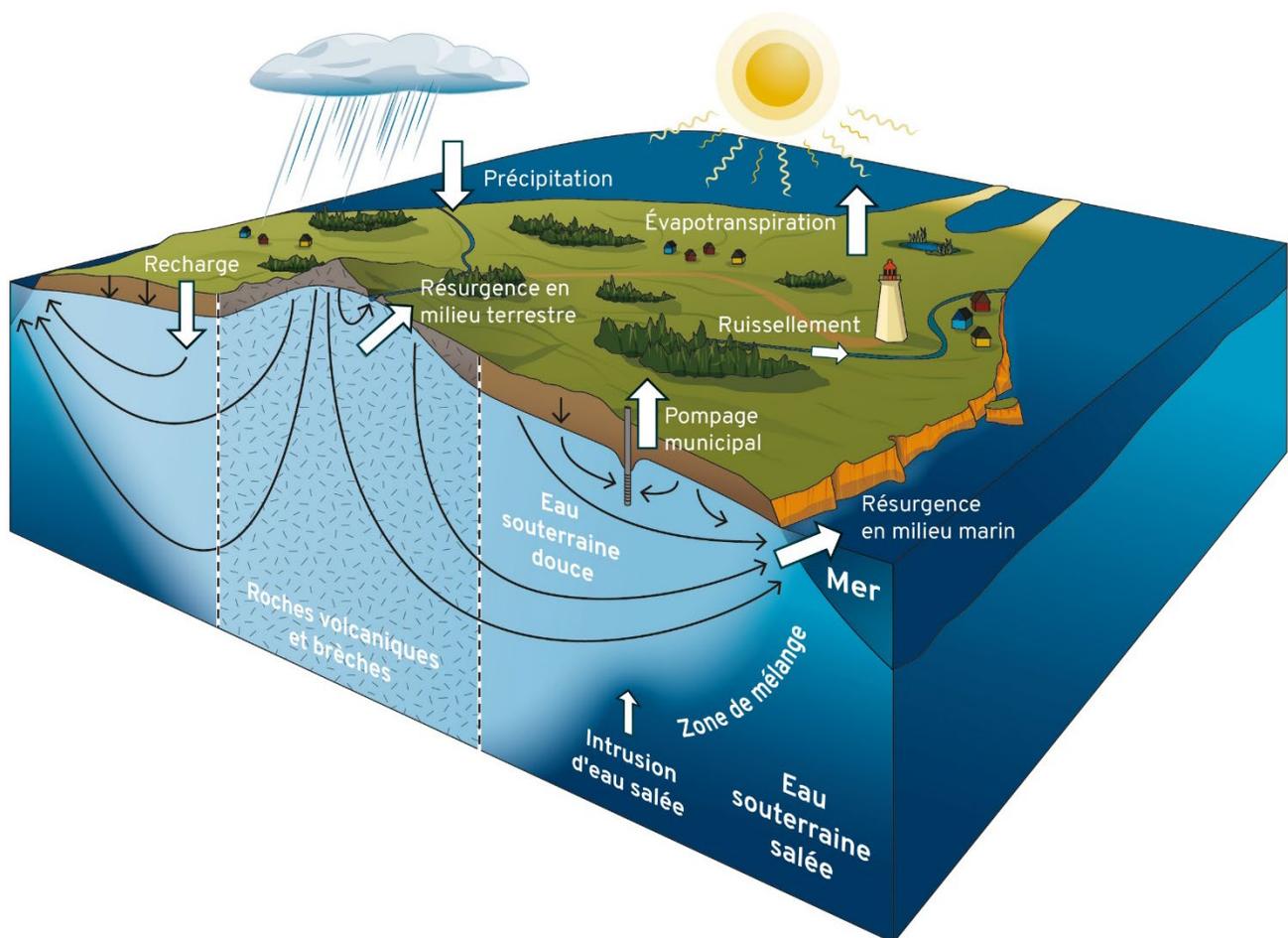


## Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine

soumis par le Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval  
au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre des  
Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec



## **MISE EN GARDE**

Les résultats du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* ont été produits à une échelle cartographique régionale afin d'établir le portrait hydrogéologique global de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine. En tout temps, dans le cas de problématiques locales, par exemple à l'échelle d'une propriété ou d'une aire d'alimentation d'un puits, des études plus détaillées sont nécessaires. L'Université Laval ne se porte pas garante des divergences entre les résultats de cette étude régionale et celles provenant d'investigations directes réalisées sur le terrain.

### **Image de couverture**

Bloc-diagramme illustrant les composantes du bilan hydrologique d'une île.

## ÉQUIPE DE RÉDACTION

### Université Laval

**Jean-Michel Lemieux**, ing., Ph.D., professeur, coordonnateur

**Alexandra Germain**, ing., M.Sc., professionnelle de recherche

**Yohann Tremblay**, M.Sc., professionnel de recherche

**Laura Gatel**, Ph.D., professionnelle de recherche

**Guillaume Arbour**, M.Sc., professionnel de recherche

**Cécile Coulon**, étudiante Ph.D.

**J. Christian Dupuis**, Ph.D., professeur

---

### Pour citer ce rapport :

Lemieux, J.-M., Germain, A., Tremblay, Y., Gatel, L., Arbour, G., Coulon, C., Dupuis, C. (2022). *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, septembre 2022, 293 p. et annexes.

### Pour nous joindre :



**Université Laval**

Faculté des sciences et de génie

Département de géologie et de génie géologique

1065, avenue de la Médecine

Québec (Québec) G1V 0A6 CANADA

T : 418-656-2193 F : 418-656-7339

<http://www.ggl.ulaval.ca>

## REMERCIEMENTS

L'équipe de réalisation du projet remercie l'appui de la Communauté maritime Les-Îles-de-la-Madeleine et des municipalités des Îles-de-la-Madeleine et de Grosse-Île qui ont reconnu la nécessité de l'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines de leur territoire. Nous remercions chaleureusement les employés municipaux qui ont coopéré tout au long du projet dans la collecte d'informations existantes, dans leur aide logistique pour la réalisation des travaux de terrain et leurs conseils dans la réalisation de certaines analyses.

Nous soulignons l'apport des collaborateurs scientifiques de l'Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) pour la réalisation de travaux de géophysique, ainsi que celui de Michel Parent, de la Commission géologique du Canada (CGC), pour le partage de ses connaissances sur les formations géologiques superficielles des îles de la Madeleine.

Nous saluons la participation de tous les collaborateurs des comités de suivi du projet, restreint et élargi (listés à la Section 1.4), qui ont aidé à identifier les préoccupations du milieu à l'égard de la ressource et contribué au partage d'informations existantes. La participation d'Hydro-Québec, et notamment l'appui du conseiller en environnement Stéphane Gagnon, est digne de mention, compte tenu du libre accès accordé aux puits d'observation d'Hydro-Québec et le partage de nombreuses données et rapports d'étude. Nous souhaitons aussi remercier Robert Robitaille, agronome à la Direction régionale Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du MAPAQ, pour l'apport de son expertise sur la pédologie et le drainage des sols.

Le précieux soutien de Guillaume Allard, responsable de travaux pratiques et de recherche, et Olivier Rabeau, chargé de conservation et de restauration, tous les deux du Département de géologie et génie géologique de l'Université Laval, est grandement apprécié.

Nous remercions aussi les anciens membres du Groupe Madelin'Eau, dont Jean-Christophe Comte et Olivier Banton pour le partage de données géophysiques prises sur le territoire d'étude, ainsi que Denis Richard pour le partage de documents.

Nous souhaitons remercier Robert Robitaille, agronome à la Direction régionale Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du MAPAQ, pour l'apport de son expertise sur la pédologie et le drainage des sols.

Nous voulons souligner la participation des citoyens qui ont permis l'accès à leurs puits pour les travaux lors des campagnes de terrain. Plusieurs organismes publics et privés ont également mis à la disposition du projet des puits et des études pertinentes qui ont servi à améliorer la qualité des résultats. Merci à tous les individus et organismes consultés, pour les réponses à nos questions et demandes d'information.

Nous tenons à remercier le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) pour leur soutien, notamment sa directrice générale Anne-Marie Decelles, pour la réalisation et l'animation des ateliers d'échange de connaissances.

Les apports et conseils d'Alexandre Pryet de l'Institut National Polytechnique de Bordeaux (Bordeaux - INP), École Nationale Supérieure en Environnement et Ingénierie du Développement durable (ENSEGID) ont été particulièrement utiles pour l'utilisation des logiciels MODFLOW-SW12 et PEST ainsi

que les conseils de Peter Bayer de la Martin Luther University of Halle-Wittenberg (MLU) en Allemagne pour le choix de la méthode d'optimisation.

Nous remercions Ouranos, et en particulier Marco Braun, spécialiste en hydroclimatologie, scénarios et services climatiques, pour le partage des données des modèles climatiques, et pour ses réponses à nos questions s'y rapportant.

Nous tenons à remercier Calcul Canada pour l'accès à la plateforme nationale de calcul informatique de pointe (CIP) et pour son support technique, nous ayant permis d'entreprendre la parallélisation des calculs de calibration des modèles numériques et d'optimisation.

Finalement, le projet n'aurait pas été possible sans la mise sur pied des Projets d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines et l'octroi du financement de la part du MELCC. Nous saluons la volonté du MELCC d'acquérir de meilleures connaissances et de doter la province d'outils d'aide à la décision pour faire face aux enjeux actuels et futurs de protection et de gestion des ressources en eau souterraine.

## ACCESSIBILITÉ DES DOCUMENTS

Le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* (présent rapport) et ses annexes cartographiques électroniques sont libres d'accès depuis le dépôt institutionnel de l'Université Laval Corpus<sup>UL</sup> à l'adresse suivante : <http://hdl.handle.net/20.500.11794/73542>.

Compte tenu de la grande quantité de résultats obtenus et de cartes produites dans le cadre de ce projet, un rapport simplifié, sous forme d'atlas hydrogéologique, a aussi été produit. Cet atlas permet de faciliter le transfert des connaissances acquises aux différents gestionnaires du territoire, mais aussi au grand public, en vulgarisant l'information disponible. Il est aussi disponible sur Corpus<sup>UL</sup> à l'adresse suivante : <http://hdl.handle.net/20.500.11794/73616>.

Pour le lecteur intéressé par les détails techniques de la préparation, du développement et de l'utilisation des modèles numériques développés dans le cadre de ce projet, un document intitulé Développement et utilisation des modèles numériques a été produit. Ce document présente entre autres les différents fichiers requis pour l'utilisation des modèles. Tous les fichiers de modélisation présentés sont accessibles gratuitement à partir de la plateforme Dataverse de l'Université Laval à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.5683/SP3/ZNGMKB>.

Les données brutes des travaux de géophysique réalisés dans le cadre de cette étude, soit 693 mesures de la méthode électromagnétique transitoire (TDEM – *Time Domain Electromagnetic Method*) et les diagraphies dans 27 puits différents, sont publiés sur Dataverse à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.5683/SP3/RG0LLE>.

Les données géomatiques pourront sous peu être visualisées sous forme de carte interactive ou téléchargées pour utilisation dans un SIG depuis le site Données Québec du Gouvernement du Québec à l'adresse suivante : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/projets-d-acquisition-de-connaissances-sur-les-eaux-souterraines-paces>. Les données de la base de données hydrogéologiques y seront disponibles en format ponctuel et celles des cartes du portrait hydrogéologique en format vectoriel ou matriciel.

## SOMMAIRE

L'eau souterraine constitue l'unique source d'approvisionnement en eau potable des îles de la Madeleine. Elle est vulnérable à l'intrusion d'eau salée qui provient de la mer et aux nombreuses activités humaines qui peuvent avoir un impact sur la quantité ou la qualité de la ressource. Les changements climatiques pourraient aussi influencer sur la disponibilité future de cette ressource. Une connaissance accrue sur l'eau souterraine et les aquifères qui la contiennent est nécessaire pour la mise en place de mesures de protection et de gestion durable de la ressource. La présente étude établit le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* à l'aide des connaissances existantes, ainsi que de nouvelles données récoltées sur le terrain.

Une des particularités de ce portrait est que plusieurs analyses hydrogéologiques ont été produites à l'aide de modèles numériques. Le modèle basé sur le programme SWB2 a permis d'obtenir un bilan hydrologique spatialisé. La cartographie de la piézométrie et de la position de l'interface eau douce – eau salée, ainsi que le développement d'outils quantitatifs, en considérant les conditions attendues dans le futur, utiles à la gestion de la ressource découlent directement des modèles d'écoulement souterrain construits sur chaque île et basés sur le programme MODFLOW-2005 et du module d'intrusion d'eau salée SWI2.

Environ 90% des près de 13 000 habitants sont desservis en eau potable à partir de quatre réseaux de distribution municipaux établis sur les quatre îles les plus peuplées. Le reste de la population s'alimente à partir de puits domestiques privés. La consommation totale annuelle est estimée à 2,2 Mm<sup>3</sup> d'eau. Cette eau provient presque en totalité des aquifères les plus perméables composés de grès, une roche très poreuse constituée de grains de sable faiblement cimentés. Ces roches forment le plateau de grès qui entoure les buttes centrales des îles formées par des roches volcaniques plus résistantes à l'érosion.

La conductivité hydraulique des grès ( $1,0 \times 10^{-5}$  m/s), leur épaisseur (> 300 m) et leur importante superficie (> 1/3 de l'archipel) en font des aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé. Tous les puits municipaux exploitent d'ailleurs ces aquifères. Les dépôts meubles chenalisés, constitués de sable fin hétérogène, s'observent principalement dans des vallées glaciaires enfouies sur les îles de la Grande Entrée, aux Loups et du Havre Aubert. Leur perméabilité et épaisseur plus faible que les grès déterminent leur potentiel d'exploitation moyen. Les roches des buttes centrales, bien que très épaisses et couvrant près du tiers de l'archipel, sont peu perméables et offrent un potentiel d'exploitation faible. Enfin, les dunes de sable qui relient les îles principales entre elles sont composées de sable uniforme très perméable, mais leur faible épaisseur ne permet qu'un potentiel d'exploitation restreint.

Le contexte hydrogéologique des îles de la Madeleine est intimement lié à la présence de la mer. L'infiltration des précipitations dans le sol alimente une nappe d'eau douce souterraine qui flotte, par contraste de densité, sur des eaux souterraines salées alimentées par la mer. Étant donné la forme de la nappe d'eau douce, celle-ci est parfois désignée sous le terme de lentille d'eau douce.

Comme la position de l'interface eau douce – eau salée est dépendante de celle de la nappe libre, des tendances similaires sont observées sur le territoire d'étude. Les profondeurs à la nappe et de l'interface sont maximales sous les buttes centrales, diminuent abruptement à la limite avec les plateaux de grès, puis décroissent doucement en direction de la mer. La surface piézométrique modélisée oscille entre 0 et 90 m pour l'ensemble de l'archipel, équivalent à une profondeur à la nappe variant de 0 m à 140 m.

Les élévations et les profondeurs sont de 5 m ou moins sur environ 50 % du territoire, et la surface piézométrique ne dépasse pas 2 m sur les îles de la Grande Entrée et aux Loups.

La profondeur de l'interface eau douce – eau salée atteint la limite inférieure des modèles hydrogéologiques entre 350 et 500 m sous le niveau moyen de la mer sous les buttes centrales. Elle est positionnée à moins de 200 m de la surface du sol sur la moitié de l'archipel. Pour les îles aux Loups et de la Grande Entrée, l'interface est moins profonde, atteignant moins de 100 m. La distribution de l'épaisseur de la lentille d'eau douce est très similaire à la profondeur de l'interface, variant de 0 à 500 m ou plus, et avec une médiane de près de 200 m. Elle ne dépasse pas 65 m d'épaisseur sur les îles aux Loups et de la Grande Entrée.

En ne considérant que les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à élevé, le volume d'eau souterraine disponible, c'est-à-dire qu'il serait possible d'extraire par des puits, est estimé à 2 700 Mm<sup>3</sup> pour les îles de la Madeleine.

Le bilan hydrique montre qu'en moyenne, à l'échelle de l'archipel, la recharge équivaut à 566 mm/an, l'évapotranspiration à 440 mm/an et le ruissellement de surface à seulement 30 mm/an, représentant respectivement 55, 42 et 3 % des précipitations annuelles. Sur terre, les résurgences se produisent lorsque la nappe affleure, dans le fond des dépressions topographiques ou au bas de fortes pentes, alimentant ainsi le réseau hydrographique de surface, ou participant à la formation ou au maintien des milieux humides. En mer, les résurgences d'eau douce diminuent plus on s'éloigne des côtes, alors que la lentille devient de plus en plus fine, jusqu'à une distance maximale d'environ 500 m. Les résurgences sur terre et en mer représentent respectivement 29 et 22 % des précipitations annuelles.

En termes de volume, c'est 48,7 Mm<sup>3</sup> d'eau qui réalimente les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé chaque année, représentant 1,8 % du volume d'eau disponible dans la lentille d'eau douce. La consommation totale annuelle correspond à 4,6 % de la recharge annuelle et moins de 0,1 % de l'eau disponible. L'eau souterraine douce est donc disponible en quantité largement suffisante pour subvenir aux besoins des habitants des îles de la Madeleine. La problématique principale liée à son exploitation réside plutôt dans les limites imposées par le risque de salinisation des puits. Il est préférable de réduire le débit de pompage individuel des puits et de distribuer les prélèvements sur le plus grand nombre possible de puits afin de diminuer le rabattement de la nappe, et minimiser la remontée de l'interface eau douce – eau salée.

Les analyses de qualité de l'eau montrent que sur les petites îles et dans les aquifères des buttes centrales des plus grandes îles, l'eau souterraine est généralement jeune, présentant une signature géochimique proche de celle de l'eau des précipitations. À l'inverse, de l'eau plus évoluée, dominée par l'anion chlorure, se retrouve parfois en bordure de la mer, due possiblement à une faible intrusion d'eau salée, à cause de la proximité du rivage ou la faible profondeur de l'interface eau douce – eau salée. Aucun dépassement des normes de potabilité de l'eau n'a été observé pour les paramètres inorganiques des 48 échantillons récoltés dans le cadre de cette étude. Par contre, 45 % des puits étaient non conformes pour les paramètres microbiologiques. Pour les objectifs esthétiques, les dépassements représentent 6 % des puits pour le chlorure, 4 % pour le sodium, 17 % pour le fer, 34 % pour le manganèse, 8 % pour le sulfate, 2 % pour le sulfure, 29 % pour les matières dissoutes totales et 29 % pour le pH. À noter que les dépassements de la recommandation pour la santé du manganèse, mais qui

ne constitue pas une norme pour la potabilité de l'eau au Québec, ont été dépassés dans 21 % des échantillons d'eau souterraine.

L'état d'équilibre du positionnement de l'interface eau douce – eau salée sous les puits d'alimentation municipaux n'est pas encore atteint. Les pourcentages de remontée de l'interface varient entre 56 et 87 % selon les puits. Les puits les plus récents de l'île de la Grande Entrée montrent les valeurs les plus faibles, alors que les valeurs les plus élevées proviennent de puits de l'île du Cap aux Meules datant des années 1970. La remontée de l'interface sous les puits de l'île du Havre Aubert est probablement encore plus lente, mais ne peut être quantifiée par le modèle numérique, car la position de l'interface se situe avant le début du pompage sous la base du modèle à 500 m sous le niveau de la mer. Les remontées devraient atteindre 95 % entre 2045 et 2100 selon les puits, potentiellement beaucoup plus à l'île du Havre Aubert.

Certains puits sur les îles du Cap aux Meules et de la Grande Entrée ont un débit de pompage qui pourrait causer leur salinisation à moyen terme. Certains autres puits sont aussi vulnérables à l'intrusion d'eau salée et disposent d'une faible marge entre leurs débits actuels et le débit maximal qu'il est possible d'exploiter sans les contaminer. En tenant compte des débits maximums qu'il serait possible d'exploiter avec le réseau de puits en place, les réseaux de distribution en eau potable des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons disposent d'une marge disponible importante d'augmentation des pompages, tandis que ceux des îles du Havre Aubert et de la Grande Entrée disposent de faibles marges. Une marge faible signifie que de nouveaux captages seraient nécessaires pour accroître le volume d'exploitation.

En combinant les impacts d'une diminution de la recharge et de la hausse relative du niveau marin, les changements climatiques devraient avoir pour effet d'abaisser l'élévation de la nappe et provoquer une remontée de l'interface eau douce – eau salée, et ainsi réduire le volume d'eau douce disponible et augmenter le risque de salinisation des puits. Ces effets attendus demeurent toutefois peu significatifs. L'impact de l'érosion côtière est aussi très mineur sur la ressource en eau, affectant seulement les secteurs très près de la mer. Les changements climatiques attendus en 2050 devraient très légèrement diminuer la quantité d'eau additionnelle disponible pour les réseaux de distribution des îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée. Cette tendance est toutefois plus importante pour l'île du Havre Aubert, qui devrait voir sa quantité d'eau additionnelle exploitable par le réseau de puits en place diminuer d'environ 15%.

Les aires d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, qui correspondent aux territoires depuis lesquels toute particule d'eau qui s'y infiltre pourra réalimenter les aquifères concernés, ont été délimités. Il s'agit des territoires qui pourraient servir l'encadrement des activités humaines pouvant avoir un impact sur la quantité ou la qualité de la ressource, notamment l'exploration et l'exploitation d'hydrocarbures.

Une stratégie de transfert des connaissances est mise en œuvre pour faciliter la prise en compte des connaissances sur l'eau souterraine dans les décisions de gestion et de l'aménagement du territoire. Un atlas vulgarisé a été produit afin de soutenir la compréhension des résultats par des non spécialistes, incluant le grand public. Deux ateliers d'échange et de transfert ont eu lieu en cours de projet avec les membres du comité de suivi élargi du projet et un atelier final est prévu aux termes de l'étude. Leurs préoccupations prioritaires à l'égard de la protection et la gestion de la ressource concernent l'exploitation

durable de la ressource, la pérennité des puits et les impacts des activités humaines. La présente étude répond directement aux deux premières préoccupations, alors que la troisième est répondue à l'échelle des aires d'alimentation des puits municipaux dans l'étude connexe Rapport d'analyse de la vulnérabilité de la source pour les prélèvements d'eau souterraine de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine – Mise à jour 2022 (Tremblay et coll., 2022). Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'alimentation en eau potable, que les aquifères sont de vulnérabilité élevée, et qu'il existe de nombreuses activités humaines pouvant affecter la ressource, il est recommandé de protéger l'ensemble des ressources en eau souterraine. Ainsi l'analyse de vulnérabilité, de même que l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi d'un plan de protection et de gestion, devraient être étendus à l'échelle des aires d'alimentation des aquifères au potentiel moyen à très élevé.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>MISE EN GARDE</b> .....	<b>II</b>
<b>ÉQUIPE DE RÉDACTION</b> .....	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ACCESSIBILITÉ DES DOCUMENTS</b> .....	<b>VI</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XIX</b>
<b>LISTE DES CARTES</b> .....	<b>XXI</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE .....	1
1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	2
1.3 DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE .....	3
1.4 ÉQUIPE DE RÉALISATION ET PARTENAIRES .....	3
1.5 STRUCTURE DU RAPPORT .....	5
<b>2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE</b> .....	<b>6</b>
2.1 LOCALISATION .....	6
2.2 TOPOGRAPHIE .....	8
2.3 MILIEU NATUREL .....	10
2.3.1 <i>Élévation du sol et bathymétrie</i> .....	10
2.3.2 <i>Pente du sol</i> .....	12
2.3.3 <i>Hydrographie</i> .....	14
2.3.4 <i>Couverture végétale</i> .....	16
2.3.5 <i>Milieus humides</i> .....	18
2.3.6 <i>Pédologie</i> .....	20
2.3.7 <i>Climat</i> .....	23
2.3.8 <i>Niveau de la mer et marée</i> .....	38
2.4 MILIEU HUMAIN .....	42
2.4.1 <i>Démographie</i> .....	42
2.4.2 <i>Occupation du sol</i> .....	43
2.4.3 <i>Affectation du territoire</i> .....	45
<b>3 EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES</b> .....	<b>48</b>
3.1 SYSTÈMES DE DISTRIBUTION EN EAU POTABLE .....	48
3.1.1 <i>Puits municipaux</i> .....	48
3.1.2 <i>Systèmes de contrôle et suivi</i> .....	53
3.1.3 <i>Débits d'exploitation</i> .....	54
3.1.4 <i>Aires de protection</i> .....	61
3.2 USAGE DE LA RESSOURCE .....	63
3.2.1 <i>Estimation de la consommation d'eau actuelle</i> .....	63

3.2.2	<i>Projections de la consommation d'eau sur les réseaux municipaux en 2050</i> .....	67
<b>4</b>	<b>ACQUISITION DES DONNÉES</b> .....	<b>72</b>
4.1	INFORMATION EXISTANTE .....	72
4.1.1	<i>Études hydrogéologiques antérieures</i> .....	74
4.1.2	<i>Suivis piézométriques</i> .....	77
4.1.3	<i>Relevés géophysiques</i> .....	78
4.2	TRAVAUX DE TERRAIN .....	81
4.2.1	<i>Échantillonnage d'eau souterraine</i> .....	83
4.2.2	<i>Essais hydrauliques</i> .....	83
4.2.3	<i>Levés géophysiques</i> .....	84
4.2.4	<i>Diagraphies</i> .....	84
4.2.5	<i>Profils de conductivité électrique</i> .....	84
4.2.6	<i>Piézométrie</i> .....	85
4.3	INVENTAIRE DES DONNÉES .....	85
4.3.1	<i>Base de données hydrogéologiques</i> .....	85
4.3.2	<i>Base de données bibliographiques</i> .....	89
<b>5</b>	<b>CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE</b> .....	<b>90</b>
5.1	CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	90
5.1.1	<i>Géologie du socle rocheux</i> .....	90
5.1.2	<i>Géologie du Quaternaire</i> .....	106
5.2	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE .....	117
5.2.1	<i>Interface eau douce – eau salée</i> .....	117
5.2.2	<i>Origine de l'eau souterraine</i> .....	123
<b>6</b>	<b>PRESSIONS SUR L'EAU SOUTERRAINE</b> .....	<b>124</b>
6.1	L'INTRUSION D'EAU SALÉE DANS DES PUIITS DE CAPTAGE.....	125
6.2	LES ACTIVITÉS HUMAINES MENAÇANTES.....	126
6.2.1	<i>Le transport et l'entreposage des hydrocarbures</i> .....	126
6.2.2	<i>La gestion des eaux usées</i> .....	128
6.2.3	<i>La gestion des matières résiduelles</i> .....	129
6.2.4	<i>L'utilisation des sels de déglacage</i> .....	130
6.2.5	<i>L'exploration et l'exploitation des ressources naturelles</i> .....	130
6.2.6	<i>L'agriculture</i> .....	133
6.2.7	<i>Les cimetières</i> .....	134
6.2.8	<i>Les activités aéroportuaires</i> .....	134
6.2.9	<i>Les activités commerciales et industrielles</i> .....	135
6.3	LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	135
<b>7</b>	<b>MODÉLISATION</b> .....	<b>136</b>
7.1	OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION .....	136
7.2	TERMINOLOGIE .....	137
7.3	CHOIX DES PROGRAMMES INFORMATIQUES .....	137
7.4	HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION.....	138
7.5	MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION .....	139
7.5.1	<i>Construction des modèles d'écoulements souterrains</i> .....	140
7.5.2	<i>Développement d'outils quantitatifs pour la gestion de la ressource</i> .....	143
7.6	LIMITES DES MODÈLES .....	144

<b>8</b>	<b>CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES .....</b>	<b>146</b>
8.1	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES.....	146
8.1.1	<i>Conductivité hydraulique, transmissivité, emmagasinement et capacité spécifique</i> .....	146
8.1.2	<i>Porosité</i> .....	151
8.2	FORMATIONS AQUIFÈRES .....	155
8.2.1	<i>Formation du Cap aux Meules</i> .....	155
8.2.2	<i>Formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons</i> .....	155
8.2.3	<i>Dunes de sable</i> .....	156
8.2.4	<i>Dépôts chenalisés</i> .....	157
8.2.5	<i>Potentiel d'exploitation des formations aquifères</i> .....	157
8.3	CARTOGRAPHIE ET DISPONIBILITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE.....	160
8.3.1	<i>Piézométrie</i> .....	160
8.3.2	<i>Position de l'interface eau douce – eau salée</i> .....	174
8.3.3	<i>Épaisseur de la lentille d'eau douce</i> .....	179
8.3.4	<i>Volume d'eau disponible</i> .....	181
8.4	RECHARGE, RÉSURGENCES ET BILAN HYDROLOGIQUE .....	182
8.4.1	<i>Analyse d'hydrogrammes de puits</i> .....	182
8.4.2	<i>Modélisation du bilan hydrologique</i> .....	185
8.4.3	<i>Bilan hydrologique de surface</i> .....	189
8.4.4	<i>Résurgences</i> .....	197
8.4.5	<i>Bilan hydrologique détaillé</i> .....	200
8.4.6	<i>Comparaison des volumes d'eau disponibles, rechargés et utilisés</i> .....	202
8.5	QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE.....	204
8.5.1	<i>Types d'eau</i> .....	205
8.5.2	<i>Potabilité de l'eau</i> .....	208
8.6	VULNÉRABILITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE.....	226
8.7	COUPES HYDROGÉOLOGIQUES.....	229
<b>9</b>	<b>GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE .....</b>	<b>235</b>
9.1	OUTILS QUANTITATIFS POUR LA GESTION DE LA RESSOURCE.....	235
9.1.1	<i>Évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux</i> .....	235
9.1.2	<i>Quantification des ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place</i> .....	241
9.1.3	<i>Délimitation des aires d'alimentation des aquifères exploitables</i> .....	256
9.2	CONSTATS ET RECOMMANDATIONS.....	260
9.2.1	<i>Disponibilité des ressources en eau souterraine</i> .....	260
9.2.2	<i>Conditions d'exploitation des réseaux de puits municipaux en place</i> .....	261
9.2.3	<i>Suivi des sources et des ressources en eau</i> .....	263
9.2.4	<i>Changements climatiques</i> .....	265
9.2.5	<i>Qualité de l'eau souterraine</i> .....	266
9.2.6	<i>Plan de protection des ressources en eau souterraine</i> .....	267
9.2.7	<i>Transfert de connaissances</i> .....	271
9.2.8	<i>Pérennité du portrait de la ressource</i> .....	272
<b>10</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>274</b>
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES .....</b>	<b>276</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>A1</b>

---

ANNEXE 1 : SCHÉMAS D'AMÉNAGEMENT ET DESCRIPTIONS STRATIGRAPHIQUES DES PUIITS D'APPROVISIONNEMENT MUNICIPAL	A2
ANNEXE 2 : CHRONIQUES JOURNALIÈRES RECONSTITUÉES DES DÉBITS D'EXPLOITATION DES PUIITS D'APPROVISIONNEMENT MUNICIPAL	A38
ANNEXE 3 : MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉVALUATION DE L'USAGE DE L'EAU	A45
ANNEXE 4 : TABLEAUX SOMMAIRES DE L'HISTORIQUE DES SUIVIS PIÉZOMÉTRIQUES	A60
ANNEXE 5 : RÉSULTATS DES TRAVAUX DE DIAGRAPHIE	A66
ANNEXE 6 : COTES DE FIABILITÉ ET CRITÈRES DE VALIDATION DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES	A94
ANNEXE 7 : CONTENU DE LA BASE DE DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES	A102
ANNEXE 8 : SCHÉMAS D'AMÉNAGEMENT ET DESCRIPTIONS STRATIGRAPHIQUES DÉTAILLÉES POUR LES PUIITS DU RSESQ	A114
ANNEXE 9 : MÉTHODOLOGIE POUR L'ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES	A128
ANNEXE 10 : MODÉLISATION POUR L'ESTIMATION DE LA RECHARGE AVEC LE PROGRAMME SWB2	A151
ANNEXE 11 : MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS AVEC LE PROGRAMME MODLFOW-2005 ASSOCIÉ AU MODULE SWI2	A167
ANNEXE 12 : MÉTHODOLOGIE POUR LES SIMULATIONS D'EXPLOITATION DURABLE DE LA RESSOURCE	A187
ANNEXE 13 : MÉTHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES	A198
ANNEXE 14 : MÉTHODOLOGIE POUR LA VALIDATION DES OBSERVATIONS DE NIVEAU D'EAU UTILISÉES POUR L'ESTIMATION LA PIÉZOMÉTRIE	A207
ANNEXE 15 : MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE	A218

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 : LOCALISATION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE .....	7
FIGURE 2.2 : SUPERFICIE DES ÎLES DE L'ARCHIPEL DES ÎLES DE LA MADELEINE.....	7
FIGURE 2.3 : LES SEPT ÎLES ROCHEUSES PRINCIPALES ET HABITÉES CONSTITUANT LE TERRITOIRE D'ÉTUDE .....	9
FIGURE 2.4 : ÉLÉVATION DU SOL ET BATHYMÉTRIE.....	11
FIGURE 2.5 : PENTE DU SOL .....	13
FIGURE 2.6 : HYDROGRAPHIE.....	15
FIGURE 2.7 : COUVERTURE VÉGÉTALE .....	17
FIGURE 2.8 : MILIEUX HUMIDES.....	19
FIGURE 2.9 : PROPORTION DES TYPES DE SOLS, CLASSÉS PAR TEXTURE ET CAPACITÉ AU DRAINAGE.....	21
FIGURE 2.10 : PÉDOLOGIE .....	22
FIGURE 2.11 : EMPLACEMENT DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, MARÉGRAPHIQUES ET DE NIVEAU DE LA NAPPE .....	25
FIGURE 2.12 : TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS DES NORMALES CLIMATIQUES DE 1981 À 2010 POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE ÎLES DE LA MADELEINE A.....	29
FIGURE 2.13 : TEMPÉRATURES ANNUELLES MOYENNES, MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIÈRES DE 1891 À 2018.....	31
FIGURE 2.14 : PRÉCIPITATIONS TOTALES, CHUTES DE PLUIE ET CHUTES DE NEIGE ANNUELLES DE 1891 À 2018 .....	32
FIGURE 2.15 : TEMPÉRATURES HIVERNALES (DÉCEMBRE À MARS) MOYENNES, MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIÈRES DE 1891 À 2018.....	34
FIGURE 2.16 : PRÉCIPITATIONS TOTALES, CHUTES DE PLUIE ET CHUTES DE NEIGE HIVERNALES (DÉCEMBRE À MARS) DE 1872 À 2018.....	35
FIGURE 2.17 : PROJECTIONS DES TEMPÉRATURES MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIÈRES, ET DES PRÉCIPITATIONS TOTALES, POUR 2021 À 2050, SELON 72 SCÉNARIOS CLIMATIQUES.....	37
FIGURE 2.18 : NIVEAU MOYEN, MAXIMAL ET MINIMAL JOURNALIER DE LA MER DE MARS 1964 À NOVEMBRE 2019 À LA STATION MARÉGRAPHIQUE CAP-AUX-MEULES .....	40
FIGURE 2.19 : CALCUL DU NIVEAU MOYEN DE LA MER AUX ÎLES DE LA MADELEINE .....	41
FIGURE 2.20 : OCCUPATION DU SOL .....	44
FIGURE 2.21 : AFFECTATION DU TERRITOIRE .....	47
FIGURE 3.1 : SYSTÈMES DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE ET PRÉLÈVEMENTS MUNICIPAUX.....	52
FIGURE 3.2 : DÉBIT D'EXPLOITATION JOURNALIER TOTAL POUR CHAQUE ÎLE EN FONCTION DU MOIS DE L'ANNÉE POUR LA PÉRIODE DE 2002 À 2020 .....	58
FIGURE 3.3 : DÉBIT D'EXPLOITATION MOYEN POUR CHAQUE ÎLE EN FONCTION DES SAISONS .....	59
FIGURE 3.4 : DÉBIT D'EXPLOITATION MOYEN JOURNALIER POUR CHAQUE ÎLE EN FONCTION DE L'ANNÉE .....	60
FIGURE 3.5 : AIRES DE PROTECTION DES PRÉLÈVEMENTS MUNICIPAUX.....	62
FIGURE 3.6 : PROPORTION DE L'USAGE DE L'EAU POUR LES DIFFÉRENTES ÎLES, SELON LES SECTEURS D'ACTIVITÉ ET LA SOURCE D'APPROVISIONNEMENT .....	67
FIGURE 3.7: DISTRIBUTION DE PROBABILITÉ DE LA CONSOMMATION (DEMANDE) PROJETÉE DES SYSTÈMES DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE EN 2050.....	71
FIGURE 4.1 : LOCALISATION DES TRAVAUX DE GÉOPHYSIQUES HISTORIQUES .....	80
FIGURE 4.2 : LOCALISATION DES TRAVAUX DE TERRAIN.....	82
FIGURE 4.3 : LOCALISATION DES OBJETS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES .....	87
FIGURE 5.1 : LOCALISATION DU BASSIN MADELEINE INDIQUANT L'ÉPAISSEUR DES ROCHES SÉDIMENTAIRES ET LA POSITION DES DIAPIRS.....	90
FIGURE 5.2 : LOCALISATION DES ÎLES DE LA MADELEINE AU CARBONIFÈRE ET AU PERMIEN .....	91
FIGURE 5.3 : SCHÉMA CHRONOLOGIQUE EXPLIQUANT LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE DES ÎLES DE LA MADELEINE .....	92
FIGURE 5.4 : DIAGRAMME SCHÉMATIQUE EXPLIQUANT LA FORMATION DES DIAPIRS.....	93
FIGURE 5.5 : COUPE GÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE DES ÎLES DE LA MADELEINE ET COLONNE STRATIGRAPHIQUE .....	94
FIGURE 5.6 : PROPORTION DES UNITÉS GÉOLOGIQUES PRÉSENTES AUX ÎLES DE LA MADELEINE.....	95

FIGURE 5.7 : COUPES GÉOLOGIQUES DES PRINCIPALES ÎLES DE L'ARCHIPEL .....	96
FIGURE 5.8 : GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX ET TRACES DES COUPES GÉOLOGIQUES .....	97
FIGURE 5.9 : PHOTOS DE LA FORMATION DU HAVRE AUX MAISONS .....	99
FIGURE 5.10 : PHOTOS DE LA FORMATION DU CAP AU DIABLE .....	100
FIGURE 5.11 : PHOTOS DU MEMBRE DE L'ÉTANG-DU-NORD .....	101
FIGURE 5.12 : PHOTOS DU MEMBRE DE L'ÉTANG-DES-CAPS .....	102
FIGURE 5.13 : PHOTOGRAPHIE AU MICROSCOPE À BALAYAGE ÉLECTRONIQUE D'UN ÉCHANTILLON DES GRÈS DU MEMBRE DE L'ÉTANG-DES-CAPS MONTRANT LA TAILLE DES GRAINS AINSI QUE LE CIMENT ET LES POINTS DE CONTACT ENTRE LES GRAINS .....	103
FIGURE 5.14 : ESTIMATION DE L'ÉLEVATION DU SOCLE ROCHEUX .....	105
FIGURE 5.15 : CHRONOLOGIE GLACIAIRE DU GOLFE DU SAINT-LAURENT À LA FIN DU QUATERNAIRE .....	106
FIGURE 5.16 : SCHÉMATISATION DU PHÉNOMÈNE D'ISOSTASIE .....	107
FIGURE 5.17 : COUPES SCHÉMATIQUES ILLUSTRANT L'HISTOIRE GÉOLOGIQUE RÉCENTE DE L'ARCHIPEL ET LES VARIATIONS RELATIVES DU NIVEAU MARIN PAR RAPPORT AU NIVEAU ACTUEL .....	108
FIGURE 5.18 : PROPORTION DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES SUPERFICIELLES .....	109
FIGURE 5.19 : GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES .....	110
FIGURE 5.20 : PHOTO DE DÉPÔTS MEUBLES .....	113
FIGURE 5.21 : ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES .....	116
FIGURE 5.22 : CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉ DES ÎLES DE LA MADELEINE .....	117
FIGURE 5.23 : PROFILS DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE .....	118
FIGURE 5.24 : SCHÉMA ILLUSTRANT L'INTRUSION D'EAU SALÉE ASSOCIÉE AU RABATTEMENT DE LA NAPPE PHRÉATIQUE DÙ AU POMPAGE DANS UN PUIIS DE CAPTAGE .....	119
FIGURE 5.25 : SCHÉMA ILLUSTRANT A) L'EFFET DE LA DIMINUTION DE LA RECHARGE; ET B) L'EFFET DE L'AUGMENTATION DU NIVEAU DE LA MER SUR LA LENTILLE D'EAU DOUCE .....	120
FIGURE 5.26 : EXEMPLE DE RÉSULTAT DE SIMULATION NUMÉRIQUE QUI MONTRE L'ÉVOLUTION DU PROFIL DE CHARGE HYDRAULIQUE SUIVANT LA CONSTRUCTION DU PUIIS, L'ÉVOLUTION DU PROFIL DE DÉBIT DANS LE PUIIS SUIVANT SA CONSTRUCTION (UN DÉBIT POSITIF INDIQUE UN ÉCOULEMENT ASCENDANT) ET LES PROFILS DE CONCENTRATION EN CHLORURES DANS LE PUIIS À DIFFÉRENTS MOMENTS SUIVANT SA CONSTRUCTION .....	122
FIGURE 6.1 : LOCALISATION DES PUIIS JOHN-FRED, À MARIO ET GE-09-05B, AYANT POMPÉ DE L'EAU SALÉE, SUR L'ÎLE DE LA GRANDE-ENTRÉE .....	126
FIGURE 6.2 : A) LOCALISATION DE MINES SELEINE PRÈS DE LA GROSSE ÎLE INDICANT LES LIMITES DE LA MINE SOUTERRAINE ET LA POSITION DES PUIIS DE POMPAGE. B) COUPE SCHÉMATIQUE ILLUSTRANT LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU SECTEUR DE LA MINE .....	131
FIGURE 7.1 : MÉTHODOLOGIE SIMPLIFIÉE DE LA MODÉLISATION DU BILAN HYDROLOGIQUE ET DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS .....	140
FIGURE 7.2 : REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE EN COUPE DU MODÈLE POUR UNE ÎLE .....	142
FIGURE 8.1 : LOCALISATION DES POINTS DE MESURES DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES .....	149
FIGURE 8.2 : PROFILS DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE HORIZONTALE ( $K_H$ ), DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE VERTICALE ( $K_V$ ) ET DE L'ANISOTROPIE ( $K_V/K_H$ ) DANS LA PORTION OUVERTE AU ROC DU PUIIS F-1 .....	151
FIGURE 8.3 : PROFILS DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE HORIZONTALE ( $K_H$ ), DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE VERTICALE ( $K_V$ ) ET DE L'ANISOTROPIE ( $K_V/K_H$ ) DANS LA PORTION OUVERTE AU ROC DU PUIIS F-2 .....	151
FIGURE 8.4 : COURBES DE RÉTENTION EN EAU DE QUATRE ÉCHANTILLONS DE GRÈS DU MEMBRE DE L'ÉTANG-DES-CAP .....	154
FIGURE 8.5 : LIMITES ET POTENTIEL D'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES .....	159
FIGURE 8.6 : PIÉZOMÉTRIE .....	162
FIGURE 8.7 : GRADIENT HYDRAULIQUE HORIZONTAL .....	164
FIGURE 8.8 : PROFONDEUR À LA NAPPE .....	166
FIGURE 8.9 : HISTORIQUE DES NIVEAUX D'EAU DANS SIX PUIIS D'OBSERVATION DU RSESQ .....	167
FIGURE 8.10 : SOMMAIRE DES VARIATIONS TEMPORELLES DE CHARGE HYDRAULIQUE POUR L'ÎLE DE LA GRANDE ENTRÉE ET LA GROSSE ÎLE .....	169

FIGURE 8.11 : SOMMAIRE DES VARIATIONS TEMPORELLES DE CHARGE HYDRAULIQUE POUR LES ÎLES DU HAVRE AUX MAISONS ET DU HAVRE AUBERT .....	171
FIGURE 8.12 : SOMMAIRE DES VARIATIONS TEMPORELLES DE CHARGE HYDRAULIQUE POUR L'ÎLE DU CAP AUX MEULES .....	173
FIGURE 8.13 : AMPLITUDE DES VARIATIONS PIÉZOMÉTRIQUES ATTRIBUABLES À LA MARÉE SELON LA DISTANCE À LA CÔTE .....	174
FIGURE 8.14 : ÉLÉVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE .....	177
FIGURE 8.15 : PROFONDEUR DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE .....	178
FIGURE 8.16 : ÉPAISSEUR DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE .....	180
FIGURE 8.17 : HAUT : TEMPÉRATURES JOURNALIÈRE ET NORMALE (1981-2010), ET PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MESURÉES À LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE ÎLE DE LA MADELEINE A DE SEPTEMBRE 2019 À AOÛT 2021. BAS : PROFONDEUR À LA NAPPE OBSERVÉE DANS TROIS PUIITS .....	183
FIGURE 8.18 : SUPERFICIE DU TERRITOIRE OCCUPÉE PAR INTERVALLE DE VALEUR POUR CHAQUE COMPOSANTE DU BILAN HYDROLOGIQUE DE SURFACE .....	191
FIGURE 8.19 : RECHARGE ANNUELLE .....	192
FIGURE 8.20 : ÉVAPOTRANSPIRATION ANNUELLE .....	193
FIGURE 8.21 : RUISSELLEMENT DE SURFACE ANNUEL .....	194
FIGURE 8.22 : VALEURS MENSUELLES MOYENNES DES COMPOSANTES DU BILAN HYDROLOGIQUE (1989-2019) .....	196
FIGURE 8.23 : MÉDIANE DE LA RECHARGE ANNUELLE SIMULÉE ENTRE 2021 ET 2050 POUR LES 72 SCÉNARIOS CLIMATIQUES .....	197
FIGURE 8.24 : SCHÉMA ILLUSTRANT LE CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE À PROXIMITÉ DE LA CÔTE .....	198
FIGURE 8.25 : RÉSURGENCES EN EAU SOUTERRAINE .....	199
FIGURE 8.26 : BLOC-DIAGRAMME ILLUSTRANT LES COMPOSANTES DU BILAN HYDROLOGIQUE DÉTAILLÉ .....	200
FIGURE 8.27 : BILAN HYDROLOGIQUE SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE INCLUS DANS LES MODÈLES D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN .....	202
FIGURE 8.28 : TYPES D'EAU SELON LA MÉTHODE DES DIAGRAMMES DE PIPER POUR LES DONNÉES TERRAIN UL ET LES DONNÉES BD .....	206
FIGURE 8.29 : TYPES D'EAU .....	207
FIGURE 8.30 : DÉPASSEMENTS DES NORMES DE POTABILITÉ POUR LES PARAMÈTRES INORGANIQUES .....	212
FIGURE 8.31 : DÉPASSEMENTS DES NORMES DE POTABILITÉ POUR LES PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES .....	215
FIGURE 8.32 : DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES POUR LE CHLORURE (Cl) ET LE SODIUM (Na) .....	219
FIGURE 8.33 : DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES POUR LE FER (Fe) ET MANGANÈSE (Mn) .....	221
FIGURE 8.34 : DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES POUR LE SULFATE (SO <sub>4</sub> ) ET LES SULFURES TOTAUX (S) .....	223
FIGURE 8.35 : DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES POUR LE PH ET LA MATIÈRE DISSOUE TOTALE .....	225
FIGURE 8.36 : VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES SELON LA MÉTHODE DRASTIC .....	228
FIGURE 8.37 : COUPES HYDROGÉOLOGIQUES .....	231
FIGURE 8.38 : TRACES DES COUPES HYDROGÉOLOGIQUES .....	234
FIGURE 9.1 : DONNÉES D'ENTRÉES INTÉGRÉES DANS LES SIMULATIONS EN RÉGIME TRANSITOIRE POUR CHAQUE PUIITS .....	237
FIGURE 9.2 : REMONTÉE DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE SOUS LES PUIITS MUNICIPAUX DE L'ÎLE DU HAVRE AUX MAISONS .....	238
FIGURE 9.3 : REMONTÉE DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE SOUS LES PUIITS DE POMPAGE MUNICIPAUX P6 ET P8 DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES ET P1, P2, P3, P4 DE L'ÎLE DU HAVRE AUBERT .....	239
FIGURE 9.4 : REMONTÉE DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE SOUS LES PUIITS MUNICIPAUX DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES, SECTEUR FATIMA .....	240
FIGURE 9.5 : REMONTÉE DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE SOUS LES PUIITS MUNICIPAUX DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES, SECTEUR DE L'ÉTANG-DU-NORD .....	240
FIGURE 9.6 : REMONTÉE DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE SOUS LES PUIITS MUNICIPAUX DE L'ÎLE DE LA GRANDE ENTRÉE .....	241
FIGURE 9.7 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR L'ENSEMBLE DES PUIITS DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES .....	244

---

FIGURE 9.8 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR CHACUN DES PUIITS DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES .....	246
FIGURE 9.9 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR L'ENSEMBLE DES PUIITS DE L'ÎLE DU HAVRE AUBERT .....	249
FIGURE 9.10 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR CHACUN DES PUIITS DE L'ÎLE DU HAVRE AUBERT .....	250
FIGURE 9.11 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR L'ENSEMBLE DES PUIITS DE L'ÎLE DU HAVRE AUX MAISONS.....	251
FIGURE 9.12 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR CHACUN DES PUIITS DE L'ÎLE DU HAVRE AUX MAISONS ....	253
FIGURE 9.13 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR L'ENSEMBLE DES PUIITS DE L'ÎLE DE LA GRANDE ENTRÉE	254
FIGURE 9.14 : DÉBIT DE POMPAGE OPTIMISÉ EN FONCTION DU RISQUE DE SALINISATION ET DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS EN 2050 POUR CHACUN DES PUIITS DE L'ÎLE DE LA GRANDE ENTRÉE .....	255
FIGURE 9.15 : EXEMPLE DE DÉLIMITATION D'AIRES D'ALIMENTATION D'AQUIFÈRES EXPLOITABLES DE L'ÎLE DU CAP AUX MEULES.....	257
FIGURE 9.16 : AIRES D'ALIMENTATION DES AQUIFÈRES EXPLOITABLES.....	259

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : DISTRIBUTION DES ÉLÉVATIONS DU SOL DU MODÈLE ALTIMÉTRIQUE NUMÉRIQUE.....	10
TABLEAU 2.2 : DISTRIBUTION DES PENTES DU SOL.....	12
TABLEAU 2.3 : DIMENSION DES TYPES DE MILIEUX AQUATIQUES.....	14
TABLEAU 2.4 : SUPERFICIE DES CLASSES DE COUVERTURE FORESTIÈRE (TYPE ÉCOLOGIQUE).....	16
TABLEAU 2.5 : SUPERFICIE PAR TYPE DES MILIEUX HUMIDES.....	18
TABLEAU 2.6 : TEXTURE ET CLASSE DE DRAINAGE ASSOCIÉE À CHAQUE SÉRIE DE SOLS.....	20
TABLEAU 2.7 : LISTE DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	24
TABLEAU 2.8 : TEMPÉRATURES DES NORMALES CLIMATIQUES DE 1981 À 2010 POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE ÎLES DE LA MADELEINE A.....	27
TABLEAU 2.9 : PRÉCIPITATIONS DES NORMALES CLIMATIQUES DE 1981 À 2010 POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE ÎLES DE LA MADELEINE A.....	28
TABLEAU 2.10 : JOURS AVEC PRÉCIPITATION DES NORMALES CLIMATIQUES DE 1981 À 2010 POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE ÎLES DE LA MADELEINE A.....	28
TABLEAU 2.11 : LISTE DES STATIONS MARÉGRAPHIQUES.....	38
TABLEAU 2.12 : DÉMOGRAPHIE DE LA COMMUNAUTÉ MARITIME LES ÎLES-DE-LA-MADELEINE.....	42
TABLEAU 2.13 : SUPERFICIE DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL.....	43
TABLEAU 2.14 : SUPERFICIES DES AFFECTATIONS POUR CHAQUE MUNICIPALITÉ.....	46
TABLEAU 3.1 : SYSTÈMES DE DISTRIBUTION EN EAU POTABLE MUNICIPAUX.....	48
TABLEAU 3.2 : AMÉNAGEMENT DES PUIITS D'EAU POTABLE DE LA MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE.....	50
TABLEAU 3.3 : DÉBITS D'EXPLOITATION MOYENS ANNUELS POUR LES PUIITS MUNICIPAUX.....	56
TABLEAU 3.4 : ESTIMATIONS DE L'USAGE DE L'EAU.....	66
TABLEAU 3.5 : BORNES DES PARAMÈTRES RÉSIDENTIELS CONSIDÉRÉES POUR LA PROJECTION DE LA CONSOMMATION EN EAU DES SYSTÈMES DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE EN 2050.....	69
TABLEAU 3.6 : ESTIMATIONS DE LA CONSOMMATION PROJETÉE DES SYSTÈMES DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE EN 2050 .....	70
TABLEAU 4.1 : SYNTHÈSE DES DONNÉES (OBJETS) RECUEILLIES PAR TYPE DE SUPPORT.....	73
TABLEAU 4.2 : SYNTHÈSE DES RAPPORTS D'ÉTUDE CONSULTÉS PAR ORGANISME.....	74
TABLEAU 4.3 : TYPES ET NOMBRES D'OBJETS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES.....	86
TABLEAU 4.4 : NOMBRE D'OBSERVATIONS DE LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES ASSOCIÉES À CHAQUE TYPE D'OBSERVATION.....	88
TABLEAU 5.1 : DISTRIBUTION DES ÉPAISSEURS DES DÉPÔTS MEUBLES.....	115
TABLEAU 5.2 : STATISTIQUES DES ÉPAISSEURS DE DÉPÔTS MEUBLES, EN MÈTRE, PAR ÎLE.....	115
TABLEAU 5.3 : MATIÈRE DISSOUTE TOTALE (MDT) ET DENSITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE OBTENUES À PARTIR DES RÉSULTATS D'ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'EAU.....	121
TABLEAU 6.1 : SUPERFICIE DU TERRITOIRE DE LA MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE OCCUPÉE PAR LES ACTIVITÉS AGRICOLLES.....	133
TABLEAU 8.1 : NOMBRE DE MESURES DE PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES COMPILÉES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES ET NOMBRE DE PUIITS CONCERNÉS.....	146
TABLEAU 8.2 : SOMMAIRE DES STATISTIQUES DES PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES PAR UNITÉ GÉOLOGIQUE.....	148
TABLEAU 8.3 : VALEURS DE POROSITÉ TOTALE ET DE POROSITÉ DE DRAINAGE RETENUE POUR CHAQUE UNITÉ GÉOLOGIQUE .....	152
TABLEAU 8.4 : SYNTHÈSE DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES FORMATIONS AQUIFÈRES DE L'ARCHIPEL.....	158
TABLEAU 8.5 : DISTRIBUTION DES ÉLÉVATIONS DE LA SURFACE PIÉZOMÉTRIQUE.....	161
TABLEAU 8.6 : DISTRIBUTION DES PROFONDEURS DE LA SURFACE PIÉZOMÉTRIQUE.....	165
TABLEAU 8.7 : DISTRIBUTION DES ÉLÉVATIONS ET DES PROFONDEURS DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE.....	175
TABLEAU 8.8 : DISTRIBUTION DES ÉPAISSEURS DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE.....	179

---

TABLEAU 8.9 : VOLUMES D'EAU TOTALE ET D'EAU DISPONIBLE DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE CONTENUS DANS LES UNITÉS GÉOLOGIQUES LES PLUS PERMÉABLES.....	181
TABLEAU 8.10 : VOLUMES D'EAU TOTALE ET D'EAU DISPONIBLE DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE CONTENUS DANS LES AQUIFÈRES DE CHACUNE DES ÎLES PRINCIPALES.....	182
TABLEAU 8.11 : SOURCE DES DONNÉES UTILISÉES DANS LE MODÈLE BILAN HYDROLOGIQUE BASÉ SUR LE PROGRAMME SWB2.....	188
TABLEAU 8.12 : BILAN HYDROLOGIQUE MOYEN ANNUEL POUR LA PÉRIODE DE JUILLET 1989 À JUIN 2019.....	190
TABLEAU 8.13 : BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL DÉTAILLÉ PAR ÎLE SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE INCLUS DANS LES MODÈLES D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN.....	201
TABLEAU 8.14 : COMPARAISON DES VOLUMES D'EAU DOUCE DISPONIBLE, DE LA RECHARGE ET DE L'EAU CONSOMMÉE..	203
TABLEAU 8.15 : NOMBRE DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES UTILISÉES.....	204
TABLEAU 8.16 : RÉSULTATS DU TYPE D'EAU.....	205
TABLEAU 8.17 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES NORMES DE POTABILITÉ – PARAMÈTRES INORGANIQUES.....	211
TABLEAU 8.18 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES NORMES DE POTABILITÉ – PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES.....	214
TABLEAU 8.19 : SOMMAIRE DES DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES.....	217
TABLEAU 8.20 : STATISTIQUES DES INDICES DRASTIC SELON LES CONTEXTES GÉOMORPHOLOGIQUES.....	227
TABLEAU 8.21 : DISTRIBUTION DES INDICES DRASTIC POUR L'ENSEMBLE DES ÎLES DE LA MADELEINE.....	227

## LISTE DES CARTES

- CARTE 1 : Délimitation de la zone d'étude  
CARTE 2 : Topographie  
CARTE 3 : Routes, limites municipales et toponymie  
CARTE 4 : Hypsométrie  
CARTE 5 : Modèle altimétrique numérique et bathymétrie  
CARTE 6 : Pente du sol  
CARTE 7 : Hydrographie  
CARTE 8 : Couverture végétale  
CARTE 9 : Milieux humides  
CARTE 10 : Pédologie  
CARTE 11 : Emplacement des stations météorologiques, marégraphiques et de suivi de la nappe  
CARTE 12 : Occupation du sol  
CARTE 13 : Affectation du territoire  
CARTE 14 : Systèmes municipaux de distribution en eau potable et aires de protection des prélèvements  
CARTE 15 : Usage de l'eau  
CARTE 16 : Géologie du socle rocheux et coupes géologiques  
CARTE 17 : Élévation du socle rocheux  
CARTE 18 : Géologie des formations superficielles  
CARTE 19 : Épaisseur des dépôts meubles  
CARTE 20 : Limites des aquifères, potentiel d'exploitation et coupes hydrogéologiques  
CARTE 21 : Piézométrie  
CARTE 22 : Gradients hydrauliques horizontaux  
CARTE 23 : Profondeur à la nappe  
CARTE 24 : Élévation de l'interface eau douce – eau salée  
CARTE 25 : Profondeur de l'interface eau douce – eau salée  
CARTE 26 : Épaisseur de la lentille d'eau douce  
CARTE 27 : Recharge  
CARTE 28 : Évapotranspiration  
CARTE 29 : Ruissellement de surface  
CARTE 30 : Résurgences d'eau souterraine  
CARTE 31 : Qualité de l'eau selon les types d'eau  
CARTE 32 : Dépassements des normes de potabilité de l'eau : paramètres inorganiques  
CARTE 33 : Dépassements des normes de potabilité de l'eau : paramètres microbiologiques  
CARTE 34 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : sodium (Na) et chlorure (Cl)  
CARTE 35 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : fer (Fe) et manganèse (Mn)  
CARTE 36 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : sulfure (S) et sulfate (SO<sub>4</sub>)

- CARTE 37 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : ph et matière dissoute totale
- CARTE 38 : Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC
- CARTE 39 : Aires d'alimentation des aquifères exploitables

## LISTE DES ACRONYMES

BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
BDGA	Base de données géographiques et administratives
BDTQ	Base de données topographiques du Québec
CGC	Commission géologique du Canada
ENSEGID	École Nationale Supérieure en Environnement et Ingénierie du Développement durable
GIEC	Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
GRIES	Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines
ICI	Industriel, commercial et institutionnel
INP	Institut national polytechnique
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
ISQ	Institut de la statistique du Québec
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MAN	Modèle altimétrique numérique
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MLU	Martin Luther University
MRC	Municipalité régionale de comté
MTQ	Ministère des Transports du Québec
OMM	Organisation météorologique mondiale
PACES	Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RPEP	Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
RQEP	Règlement sur la qualité de l'eau potable
RQES	Réseau québécois sur les eaux souterraines
RSESQ	Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec
SDA	Système sur les découpages administratifs
SIG	Système d'information géographique
SIGÉOM	Système d'information géominière
SIH	Système d'information hydrogéologique
TCR	Table de concertation régionale
TDEM	<i>Time Domain Electromagnetic Method</i>
TRE	Tomographie de résistivité électrique
UL	Université Laval
UQAR	Université du Québec à Rimouski
ZIP	Zone d'Intervention Prioritaire



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Mise en contexte

Les eaux souterraines constituent l'unique source d'eau potable pour les habitants des îles de la Madeleine et ses nombreux touristes. La contamination de la nappe ou la perte de la disponibilité de la ressource s'avérerait catastrophique, tant au niveau social, qu'économique et environnemental. En raison de son caractère insulaire, l'archipel est vulnérable à l'intrusion d'eau salée dans le réservoir d'eau douce exploitable. Les changements climatiques pourraient exacerber ce risque et contribuer à réduire la disponibilité de la ressource. De surcroît, les aquifères principaux de grès sont en contact direct avec la surface, ce qui accentue la vulnérabilité de l'eau souterraine aux activités polluantes qui s'y retrouvent. Or, le territoire est fortement développé, avec une multitude d'activités humaines qui y sont pratiquées. Ces dernières peuvent être incompatibles avec la protection de la ressource et constituer des menaces à leur qualité. Ainsi, le contexte particulier des îles de la Madeleine fait en sorte que les pressions exercées sur la ressource proviennent à la fois d'au-dessus des aquifères (activités polluantes de surface) que d'en dessous (intrusion d'eau salée). Ce constat argue fortement pour une exploitation durable de la ressource, notamment à l'aide de mesures de protection et de suivi adaptées au caractère insulaire, qui sont basées sur une connaissance approfondie sur les eaux souterraines et les aquifères qui les contiennent.

Des technologies alternatives existent pour l'exploitation et la production d'eau potable, mais ces solutions de rechange, telles qu'évaluées par Chaillou et coll. (2012), sont limitées. La récupération d'eau de pluie peut servir à toute activité ne nécessitant pas d'eau potable, mais elle est surtout intéressante pour satisfaire à la demande individuelle plutôt qu'à des besoins collectifs (BAPE, 2013). Le recyclage des eaux usées est possible, mais pour en produire de l'eau potable, des systèmes de traitement onéreux sont nécessaires, et ne remplaceraient que partiellement les besoins en eau potable (BAPE, 2013). Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse coûterait environ 7 fois le coût actuel de production en eau potable, et la qualité d'eau produite serait inférieure (BAPE, 2013). Le caractère irremplaçable de la ressource en eau souterraine des îles de la Madeleine ne fait donc aucun doute.

De nouveaux enjeux liés à la protection de la ressource ont récemment émergé. L'intérêt pour l'exploitation des hydrocarbures a contribué aux inquiétudes des citoyens des îles de la Madeleine vis-à-vis leur eau potable. Les effets liés à l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques ont d'ailleurs fait l'objet d'un rapport d'enquête et d'audience publique du BAPE (2013). Ces travaux visaient notamment à informer la population sur les enjeux de ces activités en milieu insulaire et éclairer le gouvernement dans sa prise de décision pour la protection de la ressource. Le BAPE (2013) a explicitement recommandé de réaliser un projet d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines à l'échelle de tout le territoire madelinot, dans le but d'outiller la gestion de la ressource. De surcroît, le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) exige depuis 2021 la réalisation d'une analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable municipales, renouvelable aux cinq ans. Cette analyse nécessite d'avoir en main le cadre de connaissance de base des aquifères exploités, entre autres pour la délimitation précise des aires de protection par une étude hydrogéologique. Ces nouveaux enjeux ont fortement milité en faveur de la réalisation de la présente étude.

## 1.2 Objectifs de l'étude

C'est dans ce contexte qu'en 2018, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a octroyé à l'Université Laval le mandat de réaliser le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines aux îles de la Madeleine (PACES). L'objectif de ce projet est de dresser le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* dans le but de la protéger et d'en assurer la pérennité, en fournissant des éléments de réponse aux questions fondamentales suivantes :

- Quelle est la nature des formations géologiques qui contiennent l'eau souterraine?
- D'où vient l'eau (recharge) et où va-t-elle (résurgence)?
- Est-elle potable et quels usages pouvons-nous en faire?
- Quelles sont les quantités exploitées et exploitables de façon durable?
- Est-elle vulnérable aux activités humaines?
- Quels sont les principales menaces et les principaux enjeux à considérer pour assurer une protection et une gestion durable de l'eau souterraine dans la région?

Un des objectifs spécifiques majeurs du projet est de rassembler l'ensemble des connaissances existantes et de les compiler dans une base de données hydrogéologiques unique. Beaucoup de connaissances sur les eaux souterraines ont été produites dans le passé, mais elles ne sont pas intégrées dans un portrait actuel de la ressource couvrant l'ensemble de l'archipel. La base de données hydrogéologiques contient l'ensemble des informations pertinentes provenant d'études antérieures, de base de données existantes publiques ou privées, ou de travaux de terrain réalisés dans le cadre de ce projet. Ces informations sont à la base des analyses servant à présenter le portrait des eaux souterraines et serviront de pierre d'assise pour les prochaines études hydrogéologiques. Les rapports d'étude et documents pertinents associés ont été numérisés et compilés dans une base de données bibliographiques afin de faciliter leur accès pour les futures études.

À partir des informations précédentes, le portrait de la ressource est illustré par un ensemble de produits cartographiques. Certaines thématiques couvertes concernent les milieux naturels et humains du territoire, comme la topographie, l'hydrographie, la végétation, la pédologie, la géologie, l'occupation du sol, l'affectation du territoire, les réseaux de distribution en eau potable et les usages de la ressource. D'autres présentent les conditions hydrogéologiques interprétées dans le cadre de l'étude, par exemple les limites et l'épaisseur des formations aquifères, l'élévation piézométrique, la position de l'interface eau douce – eau salée, les volumes d'eau disponibles, le bilan hydrologique incluant l'estimation de la recharge et des résurgences, la qualité de l'eau et la vulnérabilité des aquifères. Ces analyses reposent en grande partie sur la modélisation des écoulements de l'eau souterraine. La modélisation numérique a aussi permis d'évaluer les remontées de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux, de quantifier les ressources exploitables avec le réseau de puits municipaux en place tout en tenant compte des changements climatiques, et de délimiter les aires d'alimentation des aquifères exploités et exploitables qui devraient être protégées pour préserver la qualité des eaux exploitables.

### 1.3 Déroutement de l'étude

Cette étude s'est déroulée sur quatre ans, soit d'avril 2018 à mars 2022, et est divisée en trois phases :

- Phase I : Collecte des données existantes et intégrations dans une base de données hydrogéologiques à référence spatiale;
- Phase II : Travaux de terrain nécessaires à l'obtention d'informations complémentaires ou manquantes;
- Phase III : Intégration et analyse des données, production d'un rapport synthèse et de cartes hydrogéologiques, identification des menaces et des enjeux à considérer pour assurer une protection et une gestion durable de l'eau souterraine, et transfert des connaissances acquises.

Le présent rapport (Phase III de l'étude), constitue le rapport scientifique final de l'étude, et consiste en une synthèse de tous les travaux réalisés durant les quatre années du projet. La consultation des rapports Phase I (Lemieux et coll., 2019) et Phase II (Germain et coll., 2021) n'est pas nécessaire pour assurer la compréhension du présent rapport, mais pourra offrir quelques précisions lorsque ces rapports sont cités dans le texte.

### 1.4 Équipe de réalisation et partenaires

Le projet, financé par le MELCC, a été réalisé par une équipe de recherche en hydrogéologie du Département de géologie et génie géologique de l'Université Laval :

Professeurs :

Jean-Michel Lemieux  
J. Christian Dupuis  
John Molson

Professionnel(le)s de recherche :

Alexandra Germain  
Yohann Tremblay  
Guillaume Arbour  
Laura Gatel  
André Guy Tranquille Temgoua

Stagiaire post-doctoral :

Nathan Lee Young

Étudiant(e)s 3<sup>e</sup> cycle (doctorat) :

Cécile Coulon

Étudiant(e)s 2<sup>e</sup> cycle (maîtrise) :

Frédéric Croteau  
Marjorie Parenteau-Thibault  
Léo Adam-Sawyer  
Ndeye Marie Diop

Auxiliaires de recherche (étudiant(e)s, 1<sup>er</sup> cycle) :

Cédric Dubuc  
Marie-Pierre Champagne  
Marika Labbé

La collaboration de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine a permis l'accès à de nombreuses données et aux installations sur place, ainsi qu'un apport de connaissances du milieu essentiel au projet. Cette collaboration a été assurée par :

Municipalité des Îles-de-la-Madeleine :

- Caroline Richard, Directrice des services techniques et des réseaux publics

- Pascale Chevarie, Planificatrice-coordonnatrice des services techniques et réseaux publics
- Benoît Boudreau, Coordonnateur de la géomatique, des terres publiques et de l'environnement
- Annick Petitpas, Technicienne en eau potable

Municipalité de Grosse-Île :

- Janice Turnbull, Directrice générale

Les collaborateurs suivants, de l'Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE), ont contribué à la réalisation de certains travaux de géophysique :

Professeur :

Erwan Gloaguen

Professionnels de recherche :

Jean Fidele Ble

Abderrezak Bouchedda

Maxime Claprood

L'identification et la compréhension des formations géologiques superficielles a été assurée par les chercheurs suivants de la Commission géologique du Canada (CGC) de Ressources naturelles Canada et l'Université de Sherbrooke :

Chercheur de la CGC :

Michel Parent

Professeur de l'Université de Sherbrooke

Jean-Marie M. Dubois

La réalisation du projet n'aurait pas eu lieu sans la participation des partenaires régionaux suivants, répartis dans les comités de suivi restreint et élargi du projet.

Les collaborateurs du comité de suivi restreint :

- Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine
- Table de concertation régionale (TCR) des Îles-de-la-Madeleine
- Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Les collaborateurs du comité de suivi élargi :

- Municipalité de Grosse-Île
- Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
- Direction régionale Bas-Saint-Laurent et Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)
- Direction régionale Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
- Centre de services des Îles-de-la-Madeleine du ministère des Transports du Québec (MTQ)
- Direction régionale Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH)
- Direction de la santé publique Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine

- Pêches et Océans Canada - Secteur Îles-de-la-Madeleine
- Hydro-Québec
- Attention FragÎles
- Comité Zone d'Intervention Prioritaire (ZIP) des Îles
- Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes
- Conseil régional de l'Environnement Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine

## 1.5 Structure du rapport

Ce rapport est séparé en 10 sections principales. Outre l'introduction (Section 1), il débute par la présentation du territoire à l'étude (Section 2), incluant les milieux naturels et humains. La Section 3 présente les connaissances sur l'exploitation des eaux souterraines de l'archipel, en décrivant les systèmes de distribution en eau potable et estimant la consommation actuelle et projetée de la ressource. Les détails sur l'acquisition des données, par la compilation de l'information existante et la réalisation des travaux de terrain, sont expliqués à la Section 4. Les contextes géologique et hydrogéologique du territoire d'étude sont décrits à la section suivante (Section 5). Les pressions exercées sur la ressource, notamment le risque d'intrusion d'eau salée, les activités humaines menaçantes et les changements climatiques, sont ensuite décrites (Section 6). La Section 7 aborde la méthode principale adoptée par cette étude, soit la modélisation numérique des écoulements de l'eau souterraine. Les résultats obtenus principalement par la modélisation sont exposés à la Section 8, qui décrit les conditions hydrogéologiques du territoire, dont les propriétés hydrauliques et les descriptions des différentes formations aquifères, la piézométrie et la position de l'interface eau douce – eau salée, l'épaisseur et le volume des aquifères exploitables, la recharge et le bilan d'eau, la qualité de l'eau souterraine, la vulnérabilité des aquifères, et termine en intégrant ces connaissances à l'aide de coupes hydrogéologiques. La modélisation numérique a aussi permis de produire, à la Section 9, des outils quantitatifs utiles pour la gestion durable de la ressource, en évaluant la remontée de l'eau salée sous les puits, quantifier les ressources exploitables par les puits en place et établir les aires d'alimentation de l'eau douce exploitable et sur lesquelles les efforts de protection devraient être déployés. La Section 9 discute aussi des constats principaux à retenir de cette étude et soumet des recommandations. La Section 10 conclut le rapport en résumant les éléments du portrait les plus utiles pour la gestion durable de la ressource.

Les nombreuses cartes thématiques permettant d'illustrer le portrait de la ressource sont disponibles en haute résolution en format mural (42 po par 42 po) en annexe électronique. De vignettes simplifiées portant sur les mêmes thématiques, mais ne montrant que les îles principales habitées, sont présentées en tant que figures directement dans le rapport pour en faciliter la lecture. De l'information détaillée sur les méthodologies employées propres à chaque thématique, ainsi que certains résultats, se trouvent en annexes intégrées au rapport.

## 2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

### 2.1 Localisation

Les îles de la Madeleine sont un archipel de huit îles rocheuses principales, d'îlots rocheux et de cordons dunaires s'étendant sur environ 80 km au cœur du Golfe du Saint-Laurent (Figure 2.1). Elles sont entourées par les îles d'Anticosti, de Terre-Neuve, du Cap-Breton, du Prince-Édouard et la péninsule gaspésienne, toutes distantes de 100 à 200 km. Elles regroupent sept îles rocheuses principales et habitées, dont six sont reliées entre elles par des cordons dunaires, soit du sud au nord les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, aux Loups, la Grosse Île et de la Grande Entrée. L'île d'Entrée, qui n'est pas reliée aux autres, se situe à 5 km à l'est de la Pointe du Bout du Banc, la partie la plus à l'est de l'île du Havre Aubert. L'île Brion, à une vingtaine de kilomètres au nord de la Grosse Île, constitue la huitième île rocheuse. La longueur de la côte, en ne considérant que celle faisant face à la pleine mer (excluant les lagunes et bassins intérieurs, ainsi que l'île Brion, mais considérant l'île d'Entrée) est de 235,5 km (Fraser et coll., 2014).

La superficie terrestre totale de l'archipel des îles de la Madeleine s'élève à 190,5 km<sup>2</sup> (Figure 2.2). Celles des îles principales habitées varient de 0,8 km<sup>2</sup> pour l'île aux Loups, à 46,1 km<sup>2</sup> pour l'île du Cap aux Meules, pour un total de 122,9 km<sup>2</sup>, mais ne forment que 65 % du territoire terrestre de l'archipel (Figure 2.2). La superficie des cordons dunaires est significative et compte pour 30 % du territoire. L'île Brion est occupée par une réserve écologique sur presque toute sa superficie de 6,8 km<sup>2</sup>. La somme des autres îlots rocheux représente pour 2 % du territoire.

Dans le cadre de cette étude, les superficies des terres émergées ont été calculées à partir de la mise à jour de 2018 des limites marines des données cartographiques de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ), elle-même issue de la Base de données topographique du Québec (BDTQ), du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Les limites des sept îles rocheuses principales et habitées ont été discrétisées des cordons dunaires à partir des données cartographiques de la géologie du roc de Brisebois (1981) (voir Section 5.1.1.2). Ces superficies serviront dans les analyses subséquentes présentées dans ce rapport. Des superficies différentes sont rapportées dans la littérature et pourraient être attribuables à la méthode de calcul de la superficie des terres émergées, considérant des positions de la marée différentes. La source et la date des données cartographiques utilisées pourraient aussi influencer le calcul de la superficie, notamment parce que les cordons dunaires sont en perpétuel changement. Le territoire de l'archipel pourrait couvrir 202 km<sup>2</sup> selon Fraser et coll., 2014, et Héту et coll., 2020. Il pourrait même s'étaler jusqu'à 360 km<sup>2</sup> en incluant l'espace occupé par les lagunes et les superficies de sable découvertes ou faiblement submergées lors des marées les plus basses (Chaillou et coll., 2012).

La Carte 1 : Délimitation de la zone d'étude, en annexe électronique, et la Figure 2.1, présentent le territoire d'étude du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, qui se limite aux sept îles rocheuses principales et habitées. Dans le cadre de cette étude, des analyses ont parfois été réalisées pour les cordons dunaires et certains des autres îlots, mais le peu d'informations hydrogéologiques disponibles dans ces secteurs y rend les interprétations moins fiables.

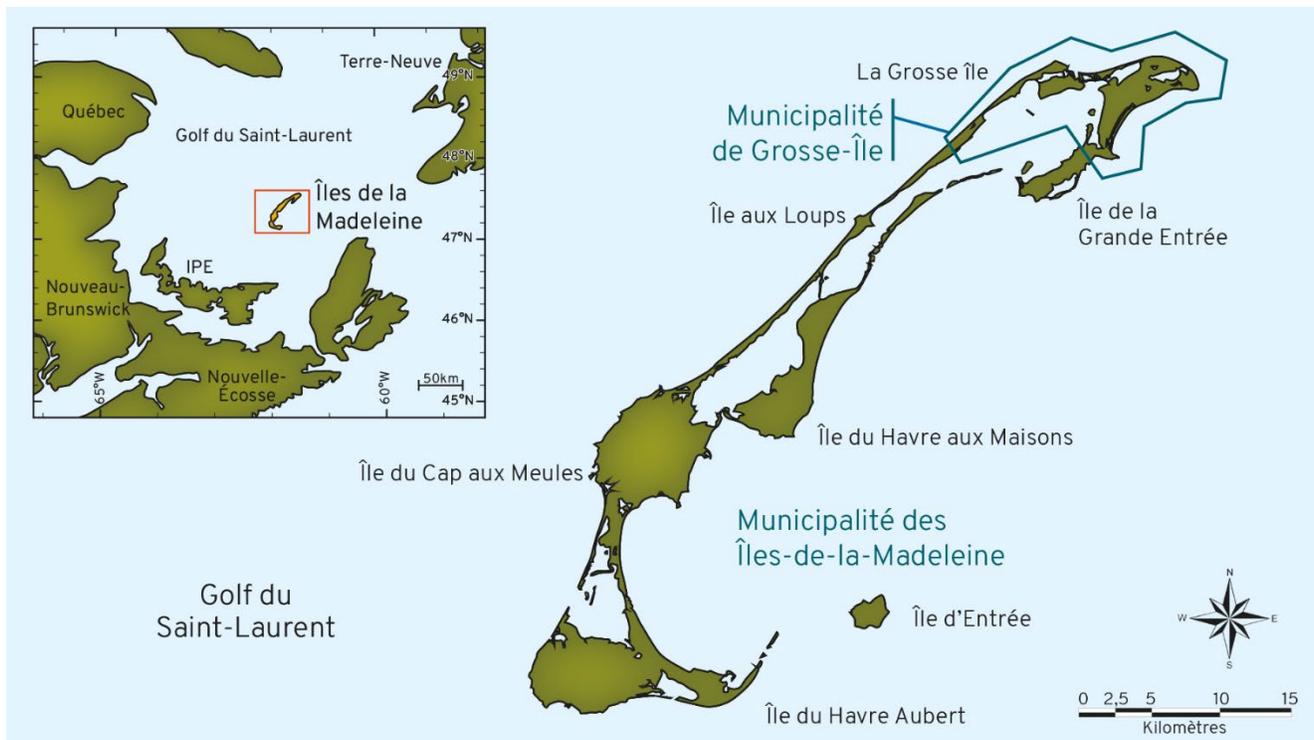


Figure 2.1 : Localisation du territoire d'étude



Figure 2.2 : Superficie des îles de l'archipel des îles de la Madeleine. Les superficies ont été calculées à partir des limites marines des données cartographiques de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ), elle-même issue de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ), du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Les limites des sept îles rocheuses principales et habitées ont été discrétisées des cordons dunaires à partir des données cartographiques de la géologie du roc de Brisebois (1981) (voir Section 5.1.1.2).

## 2.2 Topographie

La Carte 2 : Topographie, en annexe électronique, représente les formes du terrain, avec le détail de ses éléments naturels et artificiels. Les données cartographiques de la BDTQ du MERN sont présentées en format matriciel à une résolution spatiale de 2 m. La BDTQ, à l'échelle 1/20 000, constitue l'assise cartographique officielle du gouvernement du Québec. Les données ont été extraites de photographies aériennes à l'échelle de 1/40 000.

La Carte 3 : Routes, Limites municipales et toponymie, en annexe électronique, présente les limites municipales, les villages, les bâtiments et les équipements qui occupent une emprise au sol. Ces données cartographiques en format vectoriel sont issues du Système sur les découpages administratifs (SDA), de la Base de données géographiques et administratives (BDGA), et de la BDTQ, tous du MERN. Le réseau routier, aussi illustré sur la carte, est issu d'Adresse Québec, du MERN.

Tel qu'on observe avec les bâtiments visibles à la Figure 2.3, la densité des habitations est faible, mais elles sont réparties un peu partout sur les îles. La plupart des services régionaux, comme l'enseignement secondaire et collégial, les services hospitaliers, les bureaux administratifs et les principaux commerces, sont concentrés dans le village de Cap-aux-Meules et de l'Étang-du-Nord, sur l'île du Cap aux Meules. Fatima, Havre-aux-Maisons, Havre-Aubert, Grande-Entrée et Grosse-Île sont les autres villages principaux de l'archipel.

Les îles habitées, à l'exception de l'île d'Entrée, sont reliées entre elles par la route nationale 199, qui s'étend sur 84 km d'une extrémité à l'autre, et qui emprunte le réseau de cordons dunaires (Figure 2.3). Le réseau routier complet sur l'archipel fait 347 km de long, dont 31 % sont gérés par le MTQ et 69 % par les municipalités. Une liaison maritime, d'une durée de cinq heures, relie aux deux jours le port de Cap-aux-Meules depuis Souris, à l'île du Prince-Édouard. En saison touristique estivale, la fréquence augmente jusqu'à deux traversées par jour. Des liaisons aériennes, au minimum quotidien, sont assurées depuis notamment les villes de Montréal, Québec, Gaspé et Bonaventure. L'aéroport se situe sur l'île du Havre aux Maisons.

D'un point de vue administratif, l'archipel est sous la juridiction de la province du Québec et appartient à la région administrative de Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine. Deux municipalités se partagent le territoire : la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, dont le territoire s'étend sur toutes les îles habitées sauf la Grosse Île, et la Municipalité de Grosse-Île qui comprend l'île du même nom (Figure 2.1 et Figure 2.3), le secteur de Old-Harry sur la portion nord de l'île de la Grande Entrée et certaines aires protégées non habitées, comme l'île Brion. Celles-ci sont regroupées sous la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine qui fait office de municipalité régionale de comté (MRC). Du point de vue de la gestion intégrée des ressources en eau, le Comité ZIP des Îles pilote la Table de concertation régionale des Îles de la Madeleine.

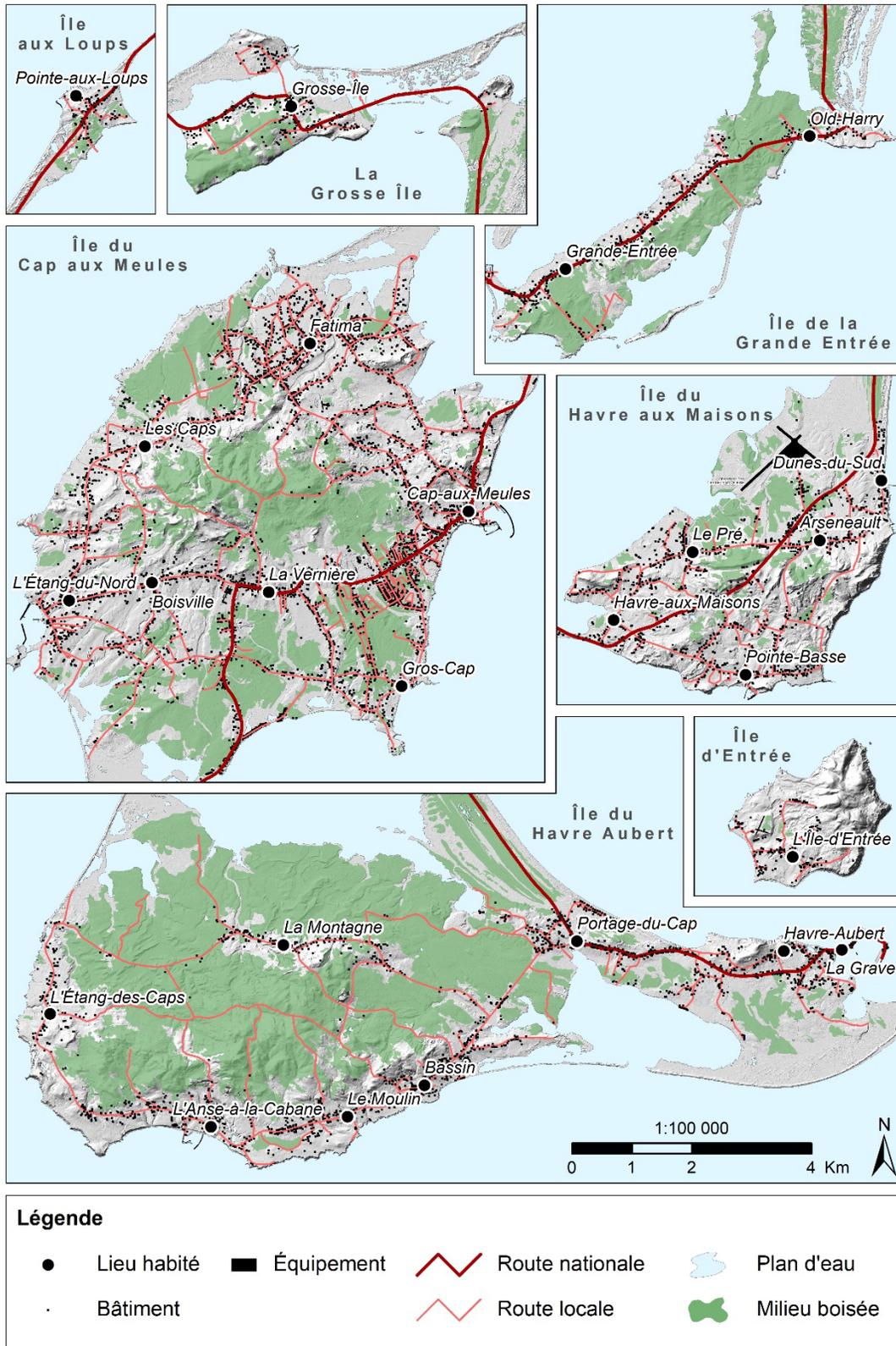


Figure 2.3 : Les sept îles rocheuses principales et habitées constituant le territoire d'étude

## 2.3 Milieu naturel

### 2.3.1 Élévation du sol et bathymétrie

La Carte 4 : Hypsométrie et la Carte 5 : Modèle altimétrique numérique et bathymétrie, en annexes électroniques, présentent toutes deux les élévations du sol par rapport au niveau moyen de la mer. La première carte illustre les courbes de niveaux, équidistantes de 10 m, provenant de la BDTQ du MERN. Les données d'élévation du sol en format matriciel de la deuxième carte sont issues d'un modèle altimétrique numérique (MAN), à une résolution spatiale de 1 m, réalisé par l'Université Laval dans le cadre de cette étude et dérivé du relevé LiDAR de 2018 du MERN. La bathymétrie en format matriciel y est aussi représentée, à une résolution spatiale de 20 m, provenant également d'un modèle numérique réalisé par l'Université Laval et dérivé des données bathymétriques de Pêches et Océans Canada. Le MAN et la bathymétrie sont illustrés pour les îles principales à la Figure 2.4.

Le terrain des îles de la Madeleine est caractérisé par trois contextes géomorphologiques distincts : les buttes centrales, les plateaux de grès et les dunes de sable. Les buttes centrales sont des collines de forme arrondie situées au centre des îles. Elles occupent les régions aux assises volcaniques constituées de roches plus résistantes à l'érosion que les terrains environnants composés de roches sédimentaires, majoritairement des grès (Brisebois, 1981; Section 5.1.1). Les plateaux de grès entourent les buttes centrales et s'étendent jusqu'au rivage marin. Ils sont relativement plats, avec les élévations qui décroissent doucement et radialement vers les côtes. Les dunes de sable forment les cordons dunaires reliant les îles principales entre elles.

La Big Hill, sur l'île d'Entrée, constitue le point culminant de l'archipel, à 169 m d'altitude, suivi de la Butte du Vent, sur l'île du Cap-aux-Meules, à 156 m d'altitude. Les altitudes maximales des autres îles rocheuses principales, soit par ordre décroissant l'île du Havre Aubert, l'île du Havre aux Maisons, la Grosse Île, l'île de la Grande Entrée et l'île aux Loups, sont respectivement de 141, 106, 86, 48 et 22 m. Plus de 75 % du territoire se situe à moins de 25 m d'altitude (Tableau 2.1).

L'élévation du fond marin diminue lentement autour des îles. En générale, la profondeur de la mer est de moins de 10 m à 1 km des côtes, et n'atteint pas 50 m avant environ 25 km. Les profondeurs moyennes à 250 m, 1 km, 10 km et 25 km des côtes sont respectivement de 2, 4, 17 et 22 m.

**Tableau 2.1 : Distribution des élévations du sol du modèle altimétrique numérique**

Quantile (%)	Élévation (m)
0	0
25	1
50	7
75	23
100	169

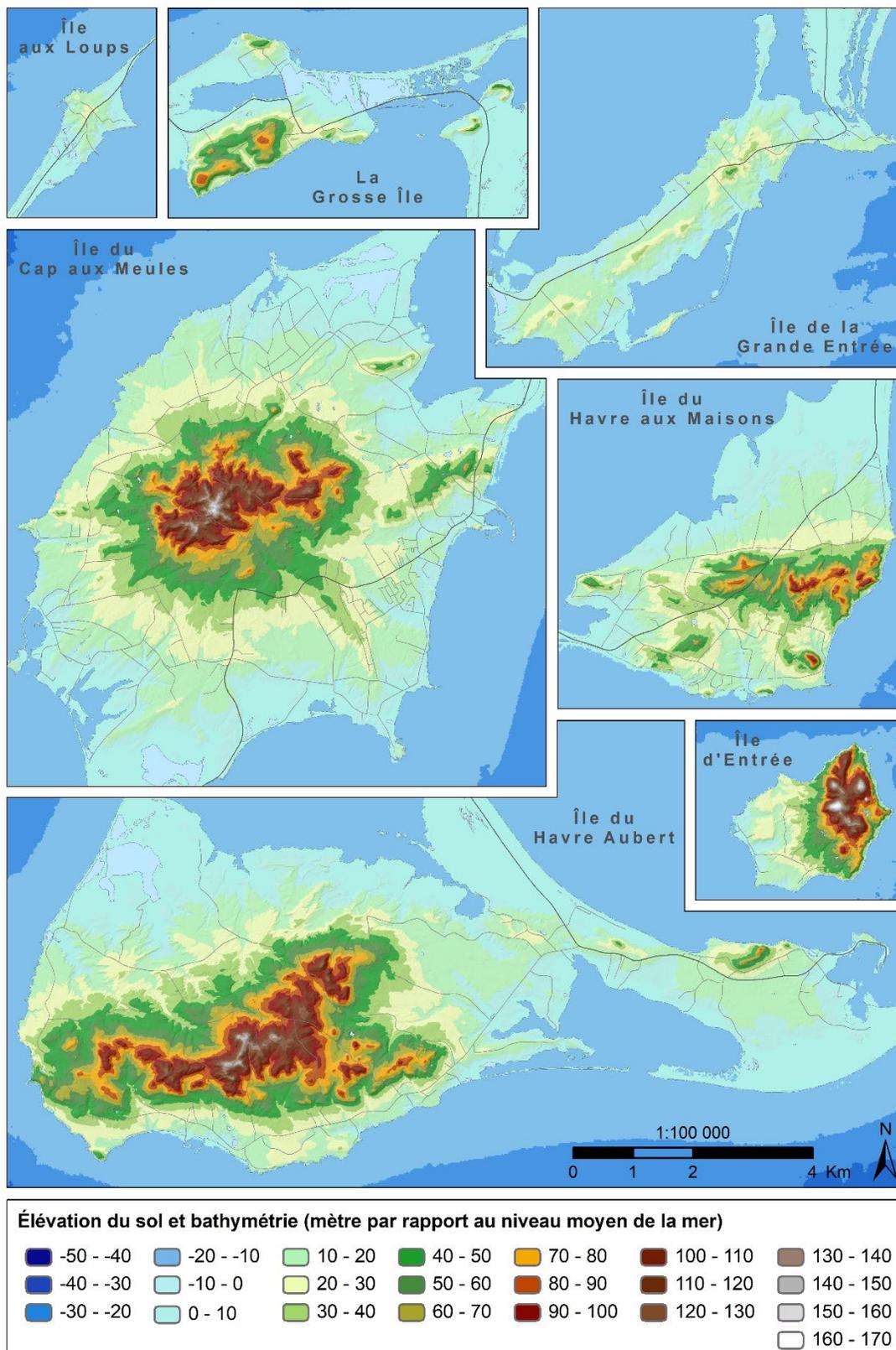


Figure 2.4 : Élévation du sol et bathymétrie

### 2.3.2 *Pente du sol*

La Carte 6 : Pente du sol, en annexe électronique, et la Figure 2.5 montrent la pente sous des classes de pourcentage, allant de la pente nulle (0 à 3 %) à la pente excessive (plus de 40 %). Les données de la pente en format matriciel à une résolution spatiale de 1 m sont issues d'un modèle numérique réalisé par l'Université Laval et dérivé du relevé LiDAR de 2018 du MERN.

Le relief est accidenté au centre des îles, dans le contexte géomorphologique des buttes centrales, où on retrouve des pentes fortes et excessives (de plus de 30 %). Les plateaux de grès sont relativement plats, à l'exception de petites dépressions longitudinales d'origine alluviale. Les pentes modérées ou moins (moins de 30 %) occupent environ 75 % du territoire (Tableau 2.2).

**Tableau 2.2 : Distribution des pentes du sol**

Quantile (%)	Pente (%)
0	0
25	5
50	15
75	30
100	1 259

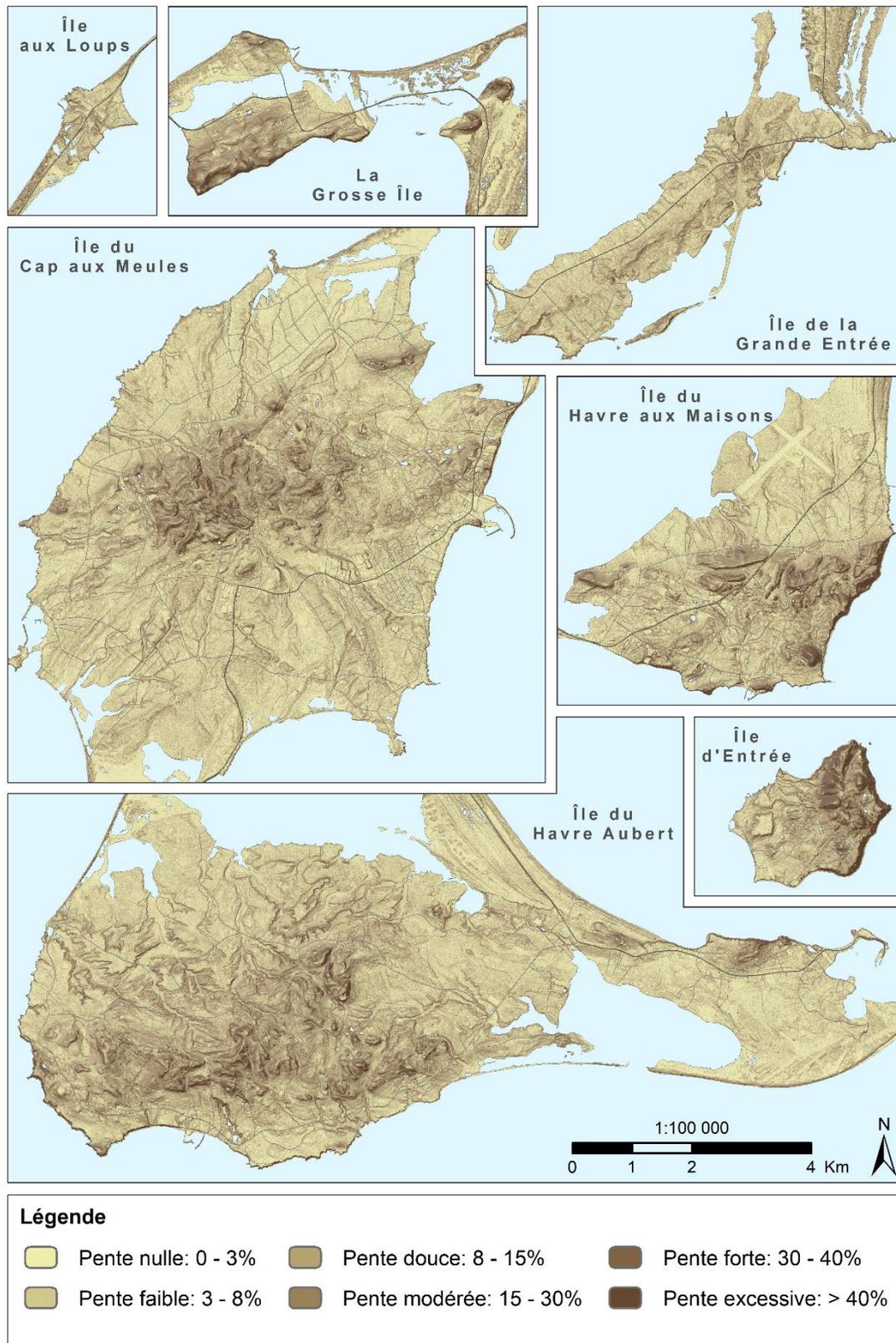


Figure 2.5 : Pente du sol

### 2.3.3 Hydrographie

La Carte 7 : Hydrographie, en annexe électronique, et la Figure 2.6 illustrent le réseau hydrographique de surface, dont les données cartographiques en format vectoriel proviennent de la GRHQ, produite en partenariat avec le MELCC et le MERN. Il s'agit d'un référentiel commun de l'hydrographie pour l'ensemble du territoire québécois.

Considérant la faible superficie des terres, le réseau hydrographique est relativement peu développé aux îles de la Madeleine. Aucun cours d'eau ne peut être qualifié de rivière. Le réseau d'écoulement d'eau de surface se résume à quelques tronçons de ruisseaux permanents, d'une longueur combinée de 60 km, et à des ruisseaux intermittents, faisant un total 301 km de long (Tableau 2.3).

On retrouve quelques lacs de faible superficie, les plus vastes de quelques hectares. Par contre, les étangs saumâtres ou salés sont beaucoup plus importants, comme l'Étang de l'Est et l'Anse aux Sables à Grosse-Île, Le Barachois et l'Étang de la Martinique à l'île du Cap aux Meules, ou l'Étang de l'Ouest à l'île du Havre Aubert, font plusieurs dizaines d'hectares. En ne considérant que les plans d'eau qui ne sont pas ouverts directement sur la mer, leur superficie totale est de 676 ha (Tableau 2.3), ce qui représente 3,5 % du territoire d'étude.

Il est à noter qu'aux îles de la Madeleine, aucun bassin versant n'est défini par la Direction de l'expertise hydrique du Québec du MELCC.

**Tableau 2.3 : Dimension des types de milieux aquatiques (excluant les milieux directement ouverts sur la mer)**

Type de milieu	Longueur ou superficie
Cours d'eau permanent	60 km
Cours d'eau intermittent	301 km
Plan d'eau (lac ou étang)	676 ha

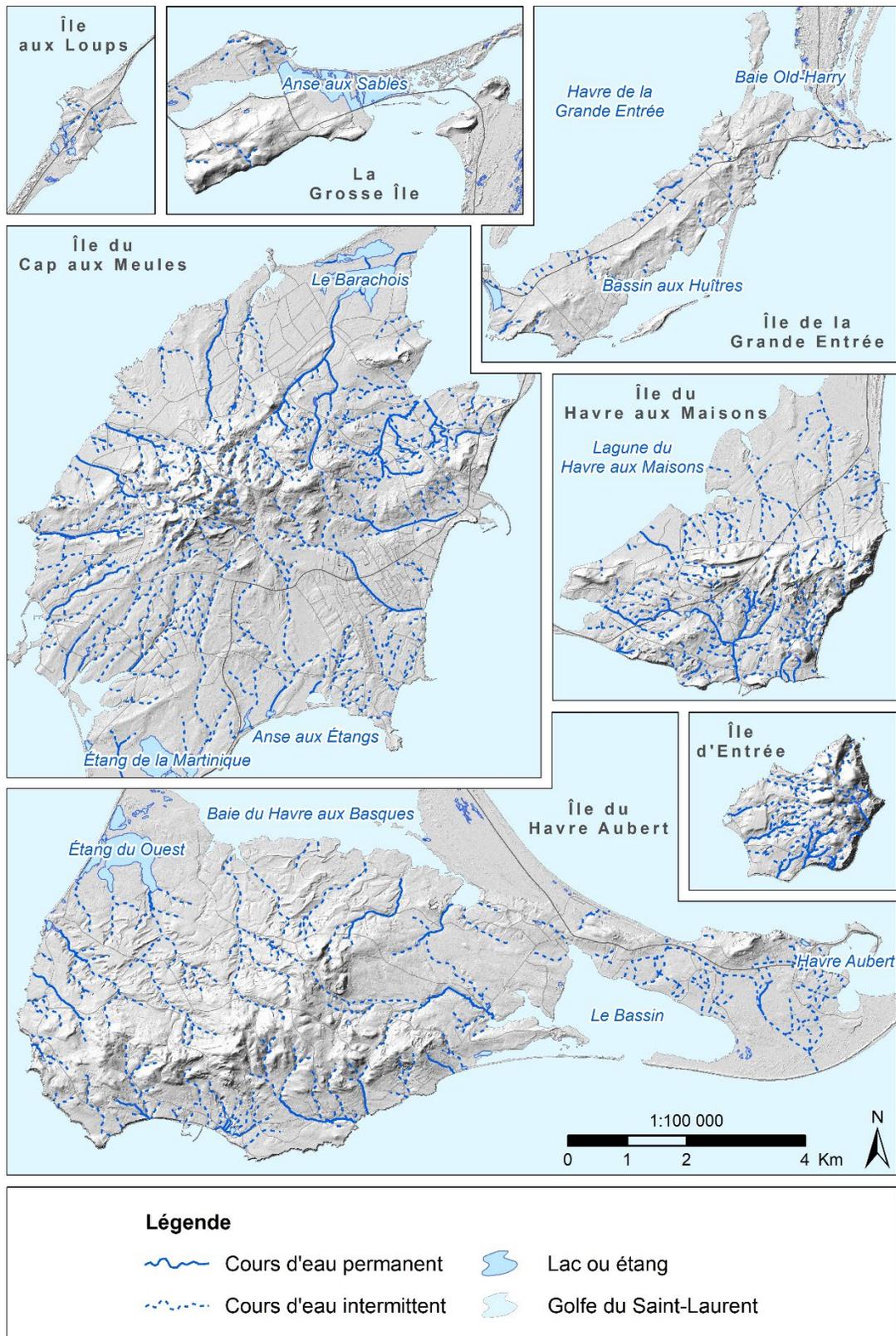


Figure 2.6 : Hydrographie

### 2.3.4 Couverture végétale

Le couvert forestier est représenté à la Carte 8 : Couverture végétale, en annexe électronique et à la Figure 2.7. Les écosystèmes y sont classifiés selon le type écologique. Il s'agit d'une unité synthèse de classification écologique exprimant les caractéristiques physiques du milieu et les caractéristiques écologiques de la végétation qui y croît (MFFP, 2018). Ces données cartographiques en format vectoriel proviennent de l'Inventaire écoforestier du Québec méridional, du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Pour les zones sans couvert forestier, ce sont les données cartographiques sur l'utilisation du territoire du MELCC qui ont été utilisées.

La classification des forêts de Ressources naturelles Canada (2021) localise les îles de la Madeleine dans la région forestière de la forêt acadienne, dont l'épinette rouge, le sapin baumier et le bouleau jaune sont les essences dominantes. Selon la classification écologique du MFFP (2021), l'archipel appartiendrait au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau à papier. Seulement 26 % de la forêt primitive serait encore présente, composée de plus de 50 % de sapins baumiers, 24 % d'épinettes noires et 24 % d'épinettes blanches (Roy-Bolduc, 2010, rapporté dans Hétu et coll., 2020).

Basés sur les données cartographiques de l'inventaire écoforestier du MFFP, environ les trois quarts du territoire d'étude, soit 146,0 m<sup>2</sup>, sont recouverts d'une couverture forestière (Tableau 2.4). Le reste du territoire est occupé essentiellement par des zones agricoles et des secteurs anthropisés. La sapinière à bouleau à papier occupe principalement les terrains les plus élevés des buttes centrales. Sur les terrains moins élevés, on retrouve la sapinière à épinette noire et dans une moindre mesure la pessière noire. La lande herbacée domine en bordure de mer et sur les cordons dunaires. Cette dernière classe de couverture forestière est la plus fréquente aux îles de la Madeleine. Des marais et tourbières sont aussi présents, principalement au pourtour des îles.

Le couvert forestier est proportionnellement le plus important sur l'île du Havre Aubert. Sur les autres îles, la part des zones anthropiques et agricoles est plus élevée.

**Tableau 2.4 : Superficie des classes de couverture forestière (type écologique)**

Couverture forestière	Superficie (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)
Lande herbacée	60,5	41,4
Sapinière à bouleau à papier	36,3	24,9
Sapinière à épinette noire	24,4	16,7
Tourbière minérotrophe	12,7	8,7
Marais ou marécage arbustif d'eau saumâtre ou salée	6,5	4,5
Pessière noire	3,3	2,3
Tourbière ombrotrophe	1,5	1,0
Marais ou marécage arbustif d'eau douce	0,8	0,5
<b>Total</b>	<b>146,0</b>	<b>100,0</b>

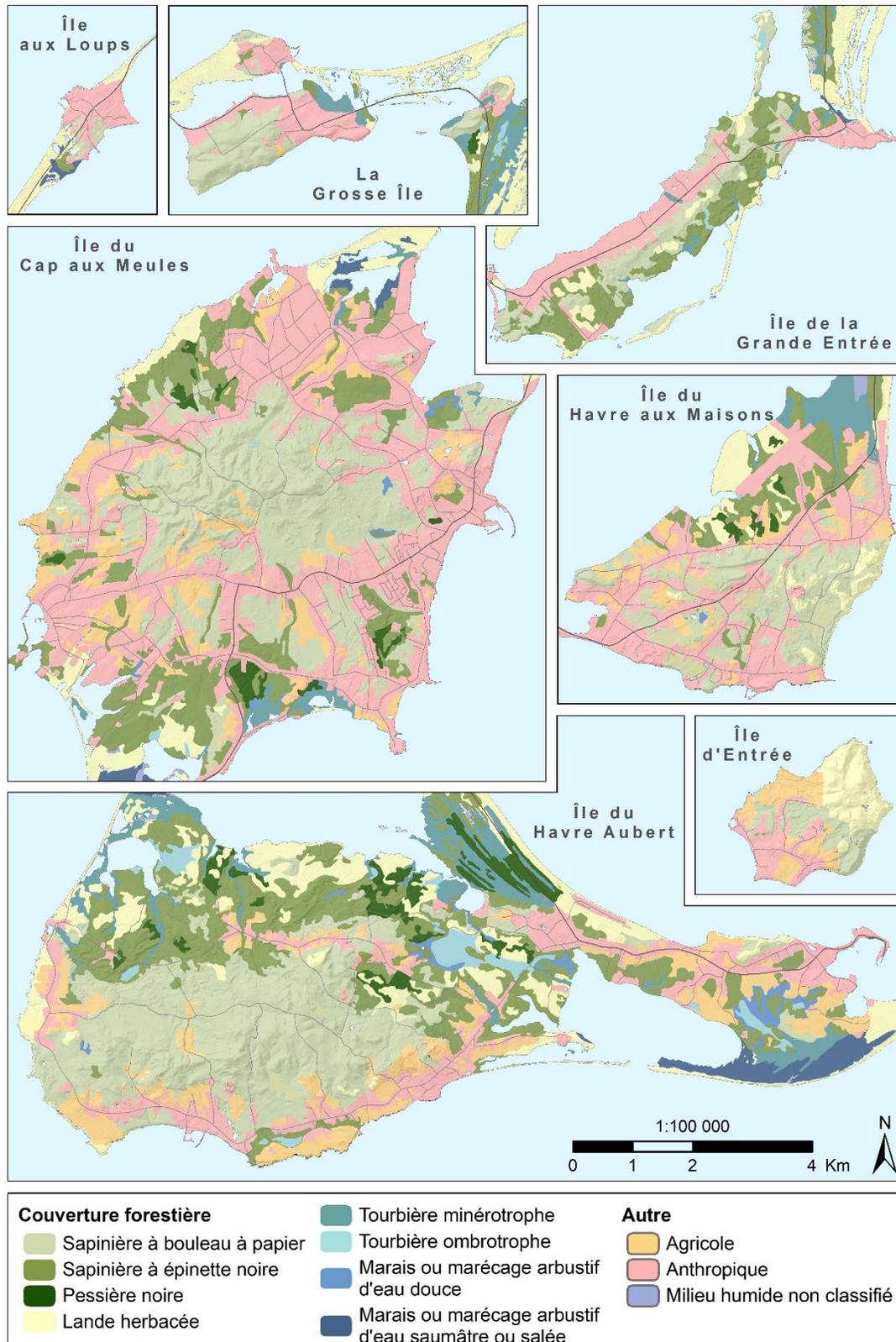


Figure 2.7 : Couverture végétale

### 2.3.5 Milieux humides

La Carte 9 : Milieux humides, en annexe électronique, et la Figure 2.8 montrent les milieux humides du territoire d'étude. Les données cartographiques en format vectoriel proviennent prioritairement du Comité ZIP des Îles, ayant effectué quatre phases de caractérisation des milieux humides en terres privés entre 2005 et 2020. Pour les milieux humides en terres publiques, les données issues de l'Inventaire écoforestier du Québec méridional, du MFFP, ont été utilisées. Les milieux humides potentiels du MELCC, ayant une couverture spatiale plus large que les données précédentes, ont été ajoutés à la carte en troisième lieu, lorsqu'aucun milieu humide n'a été identifié par le Comité ZIP des Îles et par l'Inventaire écoforestier du Québec méridional.

Les milieux humides couvrent une superficie de 4 528 ha (45,3 km<sup>2</sup>), ce qui représente environ le quart du territoire d'étude (Tableau 2.5). Les tourbières sont le type de milieu humide dominant, correspondant environ à 32 % des milieux humides. Ils sont surtout présents en bordure des îles et sur les cordons dunaires, notamment à la Pointe de l'Est à l'est de la Grosse Île, dans le secteur des Sillons au nord de l'île du Havre aux Maisons, dans le secteur des dunes du Havre aux Basques au nord-est de l'île du Havre Aubert, et au sud du secteur de La Grave sur l'île du Havre Aubert. Les marais d'eau saumâtre ou salée sont aussi importants, représentant près de 19 % des milieux humides. Ils sont situés en bordure de mer, surtout sur les cordons dunaires. Les prés humides, les marais d'eau douce et les eaux peu profondes, de superficies non négligeables (représentant respectivement 12 %, 9 % et 9 % des milieux humides), sont généralement plus petits et sont plutôt situés à l'intérieur des terres, mais tout de même concentrés sur les plateaux de grès. Les milieux humides sont relativement rares dans les secteurs des buttes centrales. Environ 17 % des milieux humides ne sont pas caractérisés, mais vu leur localisation sur les cordons dunaires, avoisinant les tourbières et les marais saumâtres ou salés, ils font probablement partie de l'une ou l'autre de ces catégories.

**Tableau 2.5 : Superficie par type des milieux humides**

Type de milieu humide		Superficie (ha)		Proportion (%)
Tourbière	Ombrotrophe (bog)	234	1 435	5,2
	Minérotrophe (fen)	1 108		24,4
	Boisée	3		0,1
	Indifférenciée	90		2,0
Marais	D'eau douce	421	1 266	9,3
	Saumâtre ou salé	845		18,7
	Indifférencié	0,1		0,0
Autres milieux humides	Pré humide	549	1 827	12,1
	Marécage	99		2,2
	Eau peu profonde	394		8,7
	Milieu humide indifférencié	786		17,3
<b>Total</b>		<b>4 528</b>		<b>100,0</b>

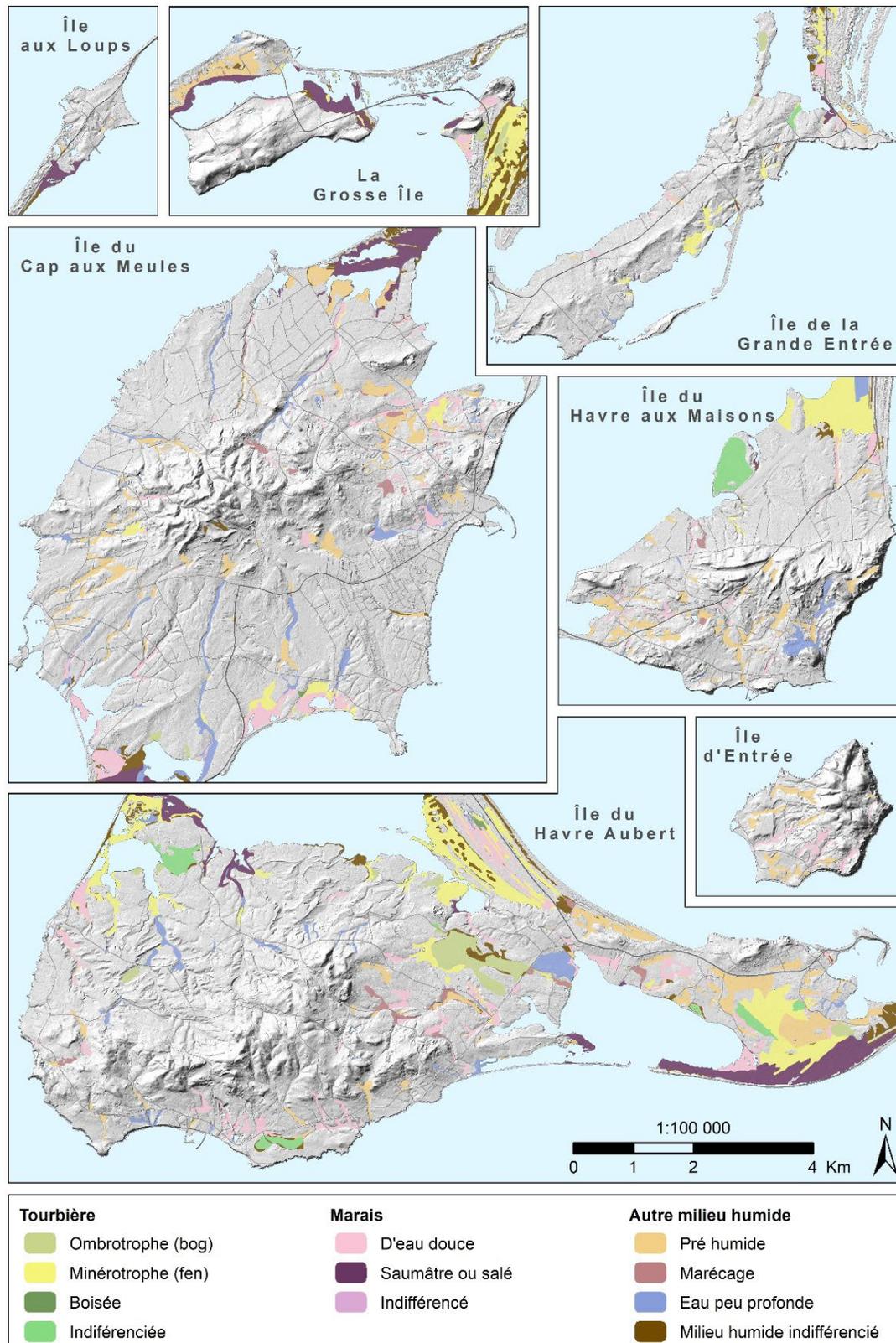


Figure 2.8 : Milieux humides

### 2.3.6 Pédologie

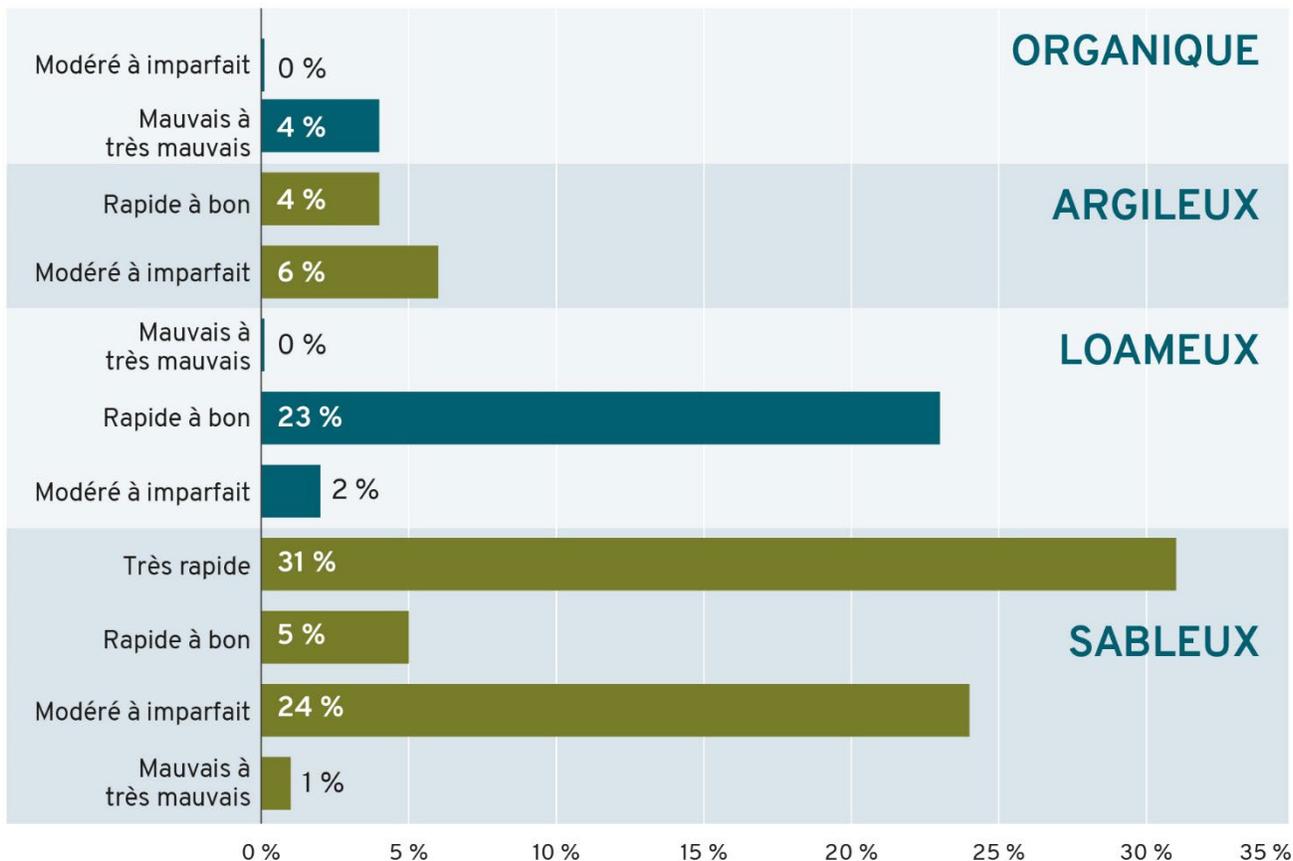
La Carte 10 : Pédologie, en annexe électronique, et la Figure 2.10 présentent les types de sols du territoire d'étude, accompagné de leur texture et leur capacité au drainage. Les données en format vectoriel utilisées proviennent de la cartographie de la pédologie des îles de la Madeleine par Tardif (1967). Pour chaque zone pédologique cartographiée, plusieurs séries de sols peuvent cohabiter. La granulométrie de chacune des séries de sols, telle que classifiée par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), a permis d'établir, pour chaque zone, la texture principale des sols. Cette dernière a été déterminée selon la première classe granulométrique (proportionnellement la plus importante) de la série de sols principale. Pour définir la capacité au drainage, les séries de sols principale et secondaire ont été prises en compte, en négligeant l'éventuel troisième série de sols qui représente toujours 20 % ou moins de l'unité pédologique. Lorsque les deux séries indiquaient une classe de drainage séparée d'un seul niveau, la classe du sol principal était conservée. Si les classes des deux séries étaient séparées de deux niveaux, le niveau intermédiaire était choisi. Dans les rares cas où les classes étaient séparées par trois niveaux, un niveau intermédiaire était sélectionné, plus proche du sol principal (par exemple sol 1 « bien drainé » et sol 2 « mal drainé » : la zone pédologique est classée comme « modérément bien drainée »). Le Tableau 2.6 présente les textures et les classes de drainage retenues pour chaque série de sols présente aux îles de la Madeleine.

Les sols sableux dominent sur le territoire d'étude et comptent pour environ 60 % des types de sols, suivis des sols loameux (25 %), des sols argileux (10 %) et des sols organiques (5 %) (Figure 2.9). Sur les buttes centrales, ce sont surtout des sols argileux et loameux que l'on observe, tandis que les plateaux de grès et les cordons dunaires sont caractérisés par les sols sableux. Les sols organiques occupent les emplacements des milieux humides (Section 2.3.5).

En général, on retrouve des sols bien drainés sur les buttes centrales et des sols au drainage moins efficace sur les plateaux de grès. Le drainage est considéré comme très rapide sur les dunes de sable et mauvais pour les sols organiques.

**Tableau 2.6 : Texture et classe de drainage associée à chaque série de sols**

Série de sols	Texture	Classe de drainage
Havre-aux-Maisons, Solomon	Argileux	Bien drainé
Grand-Ruisseau	Argileux	Imparfaitement drainé
Les Demoiselles	Loameux	Rapidement drainé
Anse-à-la-Cabane, Aurigny, Île d'Entrée, Lavernière, Le Bassin, Madelinot	Loameux	Bien drainé
Belle-Anse, Pointe-Basse	Loameux	Modérément bien drainé
Dunes	Sableux	Très rapidement drainé
Brion, Fatima, Grosse-Île	Sableux	Bien drainé
Coffin, Havre-Aubert, Vigneault	Sableux	Modérément bien drainé
Corfu, Gros-Cap	Sableux	Imparfaitement drainé
Étang-du-Nord, Millerand	Sableux	Mal drainé
Fibrisols	Organique	Mal drainé
Terre noire, Zone marécageuse	Organique	Très mal drainé



**Figure 2.9 : Proportion des types de sols, classés par texture et capacité au drainage**

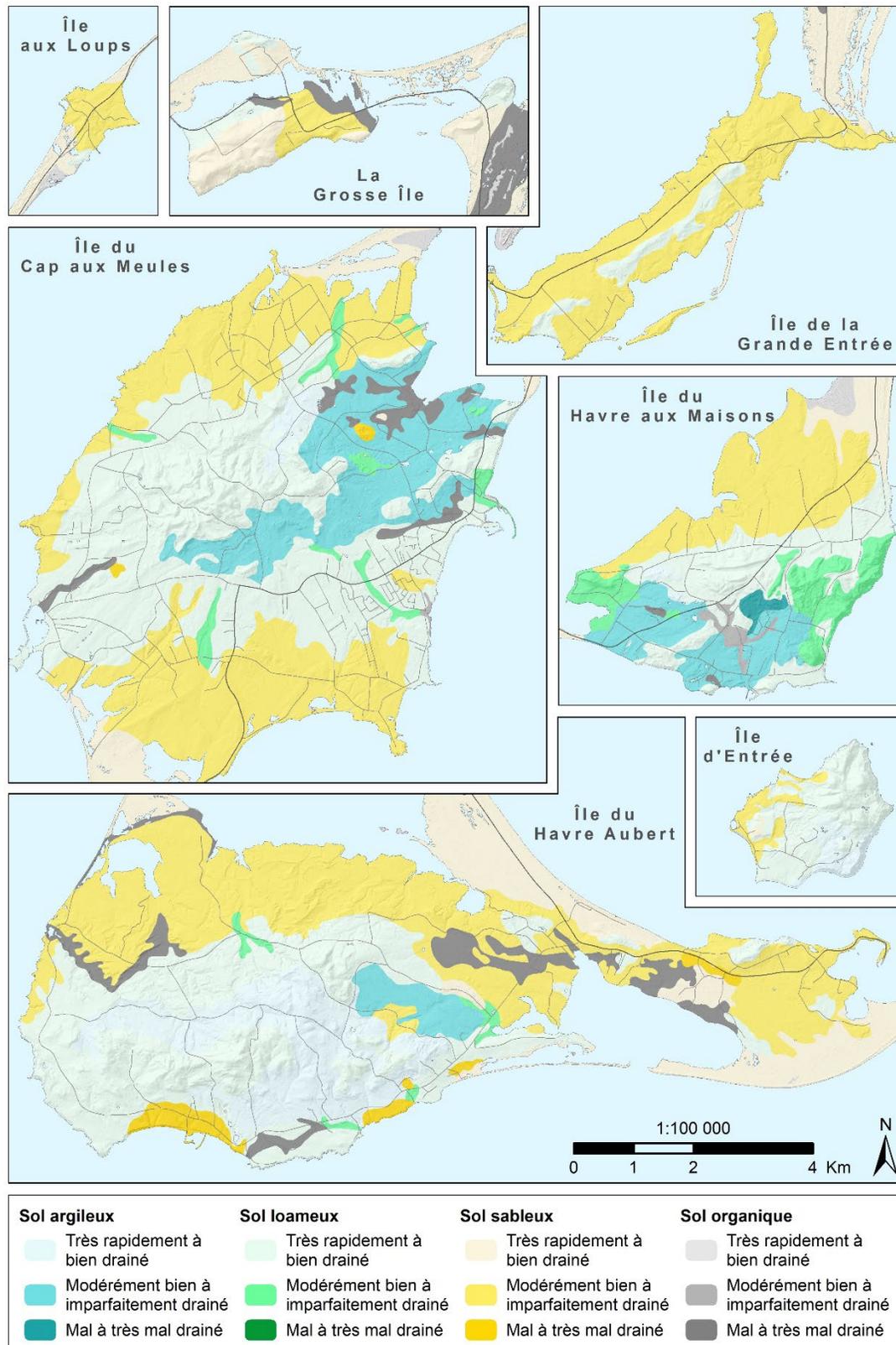


Figure 2.10 : Pédologie

### **2.3.7 Climat**

La Carte 11 : Emplacement des stations météorologiques, marégraphiques et de suivi de la nappe, en annexe électronique, et la Figure 2.11 indiquent la localisation de ces stations de mesure. Certaines des stations sont aujourd'hui fermées, mais leurs données sont toujours disponibles. Les données des stations météorologiques sont fournies par Environnement et Changement climatique Canada et par le MELCC. Le suivi des marées, assuré par Pêches et Océans Canada, est expliqué à la Section 2.3.8. Les stations de suivi de la nappe sont de sources variables et sont présentées en détail à la Section 4.1.2. L'ensemble de ces données ont notamment servi d'intrants aux modèles numériques discutés à la Section 7.

Seules deux stations météorologiques sur sept sont toujours actives aux îles de la Madeleine. Il s'agit des stations Îles de la Madeleine et Îles de la Madeleine A, situées à l'aéroport sur l'île du Havre aux Maisons. À noter que cette dernière a changé de localisation en 2013, passant d'une localisation au sud de l'aéroport à environ 1 km au nord, en bordure de la lagune du Havre aux Maisons. La première station est opérée par le Service météorologique du Canada d'Environnement et Changement climatique Canada et la deuxième par NAV Canada, la société privée qui contrôle la circulation aérienne au pays. Leur identifiant de l'Organisation météorologique mondiale (ci-après OMM) est respectivement 71710 et 71709.

À ces stations, des séries de mesures sont disponibles depuis 1978 (Tableau 2.7). De par leur situation centrale de l'île du Havre aux Maisons où est situé l'aéroport (l'ensemble du territoire d'étude se situe à moins de 37 km de ces stations météo), on considère dans les analyses subséquentes au projet actuel, notamment pour l'estimation de la recharge à la Section 8.4.2, que la météo à l'aéroport est représentative de l'ensemble du territoire d'étude et qu'elle est ainsi uniforme sur l'archipel. Les autres anciennes stations de mesure, localisées sur les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert et du Havre aux Maisons, sont fermées depuis 1985 ou avant. La station Cap-aux-Meules (station 7052960) du MELCC, sur l'île du même nom, a fourni des données quotidiennes de température et de précipitations de 1871 à 1983.

**Tableau 2.7 : Liste des stations météorologiques**

Nom de la station	ID de l'OMM	No. de la station	Année de début	Année de fin	Fréquence des données	Source des données
Amherts Island CDA EPF	-	7050100	1957	1962	Journalière	Environnement Canada
Îles de la Madeleine	71710	7053KGR	1993	-	Horaire et journalière	Environnement Canada
Îles de la Madeleine A	71709	705C2G9	1978	2013	Horaire et journalière	Environnement Canada
		7053250/ 7053254	2013	-	Horaire et journalière	Environnement Canada
Cap-aux-Meules	-	7052960	1871	1983	Journalière	MELCC
Havre-Aubert	-	7053009	1978	1985	Journalière	MELCC
Havre-aux-Maisons	-	7053010	1962	1977	Journalière	MELCC
Havre-aux-Maisons-2	-	70530A0	2006	2015	Horaire et journalière	MELCC

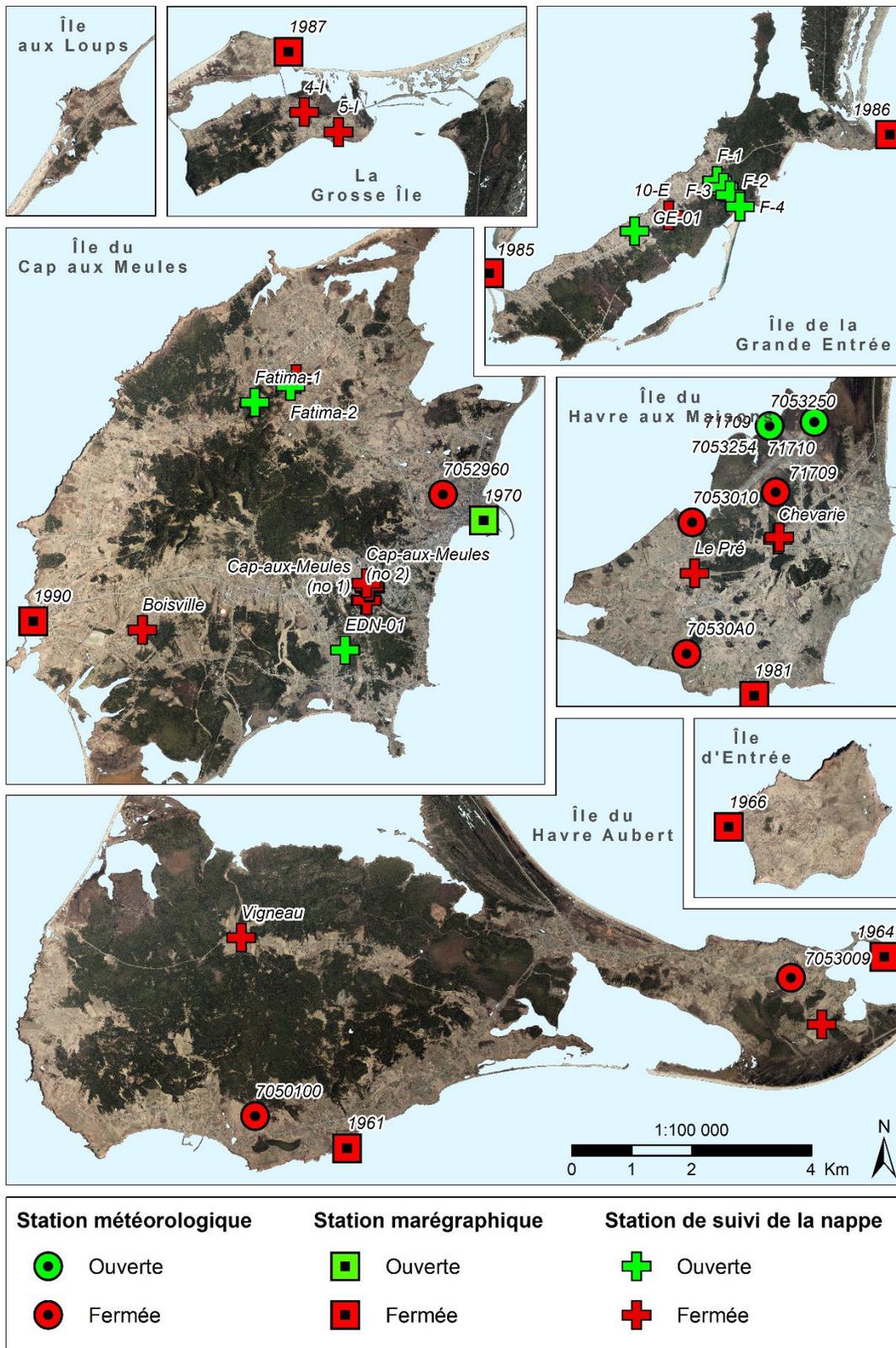


Figure 2.11 : Emplacement des stations météorologiques, marégraphiques et de niveau de la nappe

### **2.3.7.1 Climat actuel**

Les normales climatiques de la période 1981-2010 ont permis de classer, selon la classification de Köppen, le climat du territoire du Québec au sud du 51<sup>e</sup> degré de latitude de « continental froid et humide » (MELCC, 2012). Ce climat est caractérisé par un hiver froid, avec une température en moyenne sous le point de congélation de novembre à mars, et un été tempéré, avec une température moyenne supérieure à 10 °C de juin à septembre. Ce climat est aussi considéré comme humide, avec des précipitations régulières tout au long de l'année. Villeneuve (1967) a qualifié le climat des îles de la Madeleine de type maritime, puisque les températures sont moins élevées en été et moins basses en hiver que celles en territoire continental de même latitude. L'amplitude annuelle des températures y serait de 10°C plus faible à Cap-aux-Meules qu'à Québec ou Montréal selon Villeneuve (1967).

Les températures (minimum, moyenne et maximum) et les précipitations (pluie et neige) des normales climatiques de la période 1981-2010 sont représentées pour chaque mois à la Figure 2.12 pour la station Île de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709). Les températures, les précipitations et les nombres de jours de précipitation issus des normales climatiques sont détaillés respectivement au Tableau 2.8, Tableau 2.9 et Tableau 2.10.

La moyenne annuelle de la température de l'air est de 5,0°C aux îles de la Madeleine. Par convention, les températures moyennes de janvier et juillet sont rapportées à -6,4 et 17,1°C, respectivement. Cependant, février est le mois le plus froid, avec une moyenne quotidienne de -8,2°C et un minimum quotidien de -12,0°C, et août est le mois le plus chaud, avec une moyenne quotidienne de 17,8°C et un maximum quotidien de 21,0°C. Sur la période de 30 ans, les températures minimum et maximum extrêmes enregistrées sont de -26,5°C et 30,1°C. En combinant les mois de décembre à mars dont les températures mensuelles moyennes sont inférieures à 0°C, on obtient une température moyenne hivernale de -5,3°C. La température moyenne estivale, pour les mois de juin à septembre combinés dont les températures mensuelles moyennes sont supérieures à 10°C, est de 15,3°C. Les températures moyennes printanières (avril et mai) et automnales (octobre et novembre) sont respectivement de 4,1 et 5,5°C.

Les précipitations totales, tant sous forme de neige que de pluie, sont distribuées de façon plutôt uniforme durant l'année, mais sont légèrement plus importantes à l'automne et l'hiver. Les précipitations totales annuelles sont de 1 037,3 mm, variant de 73,7 mm en avril à 108,9 mm en novembre, avec une moyenne mensuelle de 86,4 mm. L'extrême quotidien enregistré est de 84,8 mm de pluie. Les îles de la Madeleine reçoivent en moyenne 236,8 cm de neige par année. Les chutes de neige sont les plus importantes de décembre à mars, avec un pic de 61,1 cm en janvier. Un extrême quotidien de 31,0 cm a été mesuré. En avril et novembre, les chutes de neige sont moins fréquentes, avec des moyennes autour de 17,0 cm. Des précipitations neigeuses ont rarement lieu en mai (moyenne de 4,5 cm) et octobre (moyenne de 0,7 cm). De juin à septembre, les précipitations sont exclusivement sous forme de pluie. Des chutes de pluie significatives ont lieu tout au long de l'année. En moyenne en hiver (décembre à mars), l'archipel reçoit 36,8 mm de pluie par mois. Par comparaison, l'équivalent en eau des chutes de neige durant cette période est de 49,3 mm, ce qui correspond à 57 % des précipitations hivernales. Annuellement, ce sont 23 % des précipitations qui tombent sous forme de neige. La couverture neigeuse moyenne est de 7 cm en hiver (de décembre à mars) et atteint son maximum en février avec 11 cm. L'extrême mesuré est de 44 cm.

Au total dans une année, on dénombre 131 jours de pluie de 0,2 mm ou plus et 80 jours de neige de 0,2 cm ou plus, pour un total de 211 jours avec des précipitations (58 % des jours de l'année). Par mois, le nombre maximum des jours avec une précipitation est de 25 en octobre pour la pluie et de 20 en janvier pour la neige. Lorsqu'on considère des chutes de pluie de 10 mm ou plus et des chutes de neige de 10 cm ou plus, ce sont respectivement 25 et 5 jours de précipitations qui sont concernées pour une année. Une couverture de neige d'au moins 1 cm est observée durant 114 jours dans l'année. Le mois de janvier en compte le maximum, soit 29. Annuellement, il y a en moyenne 37 jours où l'épaisseur de neige dépasse 10 cm.

Il est bien connu que les îles de la Madeleine sont venteuses, dû à leur localisation au cœur du Golfe du Saint-Laurent. L'Agglomération des Îles-de-la-Madeleine (2010 – rapporté dans Hétu et coll., 2020) mentionne une moyenne de vitesse du vent de 31 km/h. Des vitesses extrêmes du vent atteignant 100 km/h ont été enregistrées durant la période de 1981 à 2010, avec des rafales jusqu'à 132 km/h.

**Tableau 2.8 : Températures des normales climatiques de 1981 à 2010 pour la station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM : 71709)**

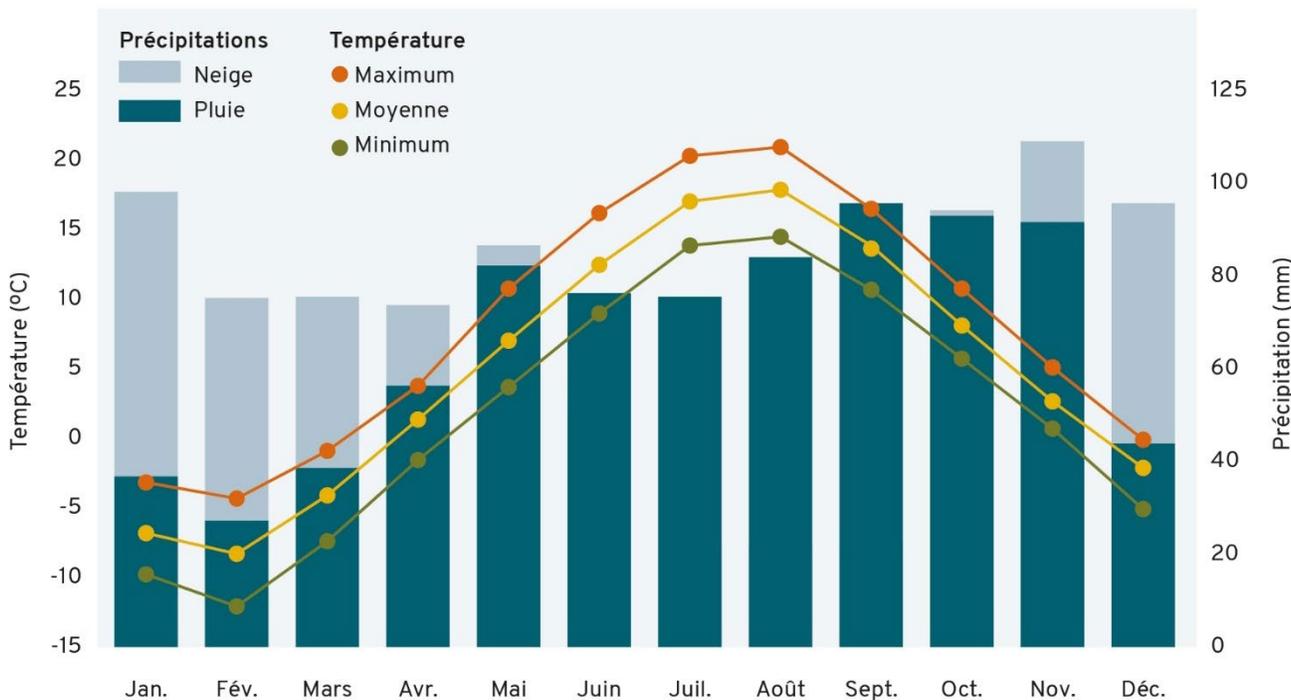
Paramètre	Température (°C)
Moyenne quotidienne annuelle	5,0
Moyenne quotidienne en janvier	-6,4
Moyenne quotidienne en février (mois le plus froid)	-8,2
Moyenne quotidienne en juillet	17,1
Moyenne quotidienne en août (mois le plus chaud)	17,8
Minimum quotidien en février	-12,0
Minimum extrême (le 26 janvier 1994)	-26,5
Maximum quotidien en août	21,0
Maximum extrême (le 10 août 2001)	30,1
Moyenne hivernale de décembre à mars (mois dont la moyenne quotidienne est < 0°C)	-5,3
Moyenne estivale de juin à septembre (mois dont la moyenne quotidienne est > 10°C)	15,3
Moyenne printanière de mars et avril (mois dont la moyenne quotidienne est > 0°C et < 10°C)	4,1
Moyenne automnale d'octobre et novembre (mois dont la moyenne quotidienne est > 0°C et < 10°C)	5,5

**Tableau 2.9 : Précipitations des normales climatiques de 1981 à 2010 pour la station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM : 71709)**

Paramètre	Précipitation (mm pour la pluie – cm pour la neige)
Précipitations totales annuelles	1 037,3
Précipitations totales mensuelles	86,4
Précipitations totales en avril (mois le plus sec)	73,7
Précipitations totales en novembre (mois le plus humide)	108,9
Chutes de pluie annuelles	802,6
Chutes de pluie mensuelles	66,9
Chutes de pluie hivernales mensuelles (décembre à mars)	36,8
Chutes de neige annuelles	236,8
Chutes de neige hivernales mensuelles (décembre à mars)	49,3
Chutes de neige en janvier (mois le plus neigeux)	61,1
Extrême quotidien de pluie (le 1 <sup>er</sup> août 1990)	84,8
Extrême quotidien de neige (le 1 <sup>er</sup> février 1987)	31,0
Couverture de neige moyenne en hiver (décembre à mars)	7
Couverture de neige moyenne en février (mois avec la couverture maximale)	11
Extrême quotidien de couverture de neige (le 9 mars 1992)	44

**Tableau 2.10 : Jours avec précipitation des normales climatiques de 1981 à 2010 pour la station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM : 71709)**

Paramètre	Nombre de jours
Jours de l'année avec des chutes de pluie $\geq 0,2$ mm	131
Jours du mois d'octobre (maximum) avec des chutes de pluie $\geq 0,2$ mm	17
Jours de l'année avec des chutes de pluie $\geq 10$ mm	25
Jours de l'année avec des chutes de neige $\geq 0,2$ cm	80
Jours du mois de janvier (maximum) avec des chutes de neige $\geq 0,2$ cm	20
Jours de l'année avec des chutes de neige $\geq 10$ cm	5
Jours de l'année avec une épaisseur de neige $\geq 1$ cm	114
Jours du mois de janvier (maximum) avec une épaisseur de neige $\geq 1$ cm	29
Jours de l'année avec une épaisseur de neige $\geq 10$ cm	37



**Figure 2.12 : Températures et précipitations des normales climatiques de 1981 à 2010 pour la station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM : 71709) (neige en équivalent en eau)**

### 2.3.7.2 Climat historique

La station météorologique Cap-aux-Meules (no. du MELCC 7052960) possède une longue chronique de mesures permettant de suivre l'évolution du climat depuis 1934 jusqu'à 1982. Des données encore plus anciennes sont disponibles à cette même station, soit de 1891 à 1896. Les mesures journalières disponibles concernent les températures maximales et minimales (pas de température moyenne), ainsi que les précipitations totales, les chutes de pluie et les chutes de neige. La combinaison des données des stations météorologiques Îles de la Madeleine (ID de l'OMM 71710) et Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) fournissent aussi une assez longue chronique de mesures, mais plus récente, soit de 1985 à 2018. Les mesures pour les mêmes paramètres que pour la station Cap-aux-Meules sont disponibles, en plus de la température moyenne quotidienne permettant de calculer la température moyenne annuelle.

Les moyennes annuelles des températures ont été calculées à partir des données quotidiennes des températures moyennes, maximales et minimales. Pour les précipitations, ce sont les totaux annuels qui ont été compilés pour la pluie, la neige et les précipitations totales. Les moyennes et les totaux annuels n'ont pas été calculés lorsque pour une année, le nombre de jours sans mesure était supérieur à 20. Ainsi, l'ensemble des données de l'année 1957 ont été exclues, de même que les températures moyennes de 1984 et 1986 et les précipitations pour 2013 et 2018. Il faut aussi préciser que pour ces dernières stations, les chutes de pluie et de neige n'ont pas été mesurées après 2001, à l'exception de la neige de 2006 à 2012. À noter que lors de la jointure des données des différentes stations, les données retenues pour une année sont celles de la station pour laquelle le plus grand nombre de mesures étaient disponibles. La Figure 2.13 et la Figure 2.14 illustrent respectivement l'évolution des températures et des

précipitations pour la période de 1891 à 2018 pour les stations combinées Cap-aux-Meules, Îles de la Madeleine et Îles de la Madeleine A.

Selon Lemieux et coll. (2015), les températures moyennes annuelles aux îles de la Madeleine auraient augmentées de  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{an}$  pour la période de 1985 à 2012. Cette valeur est similaire à celle de  $0,09^{\circ}\text{C}/\text{an}$  rapportée par Bernatchez et coll. (2008) entre 1985 et 2006. En se servant des mêmes données que ces auteurs, mais en ajoutant les mesures disponibles jusqu'en 2018, la hausse des températures moyennes annuelles serait de  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{an}$ , tel qu'indiqué par la pente de la droite de régression de la Figure 2.13, ce qui suggère un ralentissement du réchauffement dans les dernières années. Si on ne considère que les 15 dernières années (2004-2018), on observe d'ailleurs une diminution de la température moyenne annuelle de  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{an}$ .

Les températures journalières maximales et minimales ont augmenté depuis 1891 à un rythme similaire d'environ  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{an}$ . En considérant la même période de 34 ans (1985-2018) que pour l'analyse des températures moyennes, les températures journalières maximales et minimales ont augmenté plus rapidement que durant les 127 dernières années (1891-2018), soit de  $0,03$  comparativement à  $0,07^{\circ}\text{C}/\text{an}$ . Si la tendance des températures moyennes était similaire, on pourrait interpréter que la hausse de  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{an}$  depuis 1985 est surestimée.

Concernant l'évolution des précipitations totales annuelles, Lemieux et coll. (2015) rapportent une hausse de  $3,4 \text{ mm}/\text{an}$  pour la période de 1985 à 2012, ce qui correspond à près du double de la hausse de  $1,6 \text{ mm}/\text{an}$  rapportée par Bernatchez et coll. (2008) entre 1985 et 2006. Depuis 1891, on constate plutôt des précipitations totales relativement stables selon la pente de la droite de régression de la Figure 2.14 (légère baisse de  $0,1 \text{ mm}/\text{an}$ ). En ne considérant que les 15 dernières années (2004-2018), c'est plutôt une diminution de  $12,3 \text{ mm}/\text{an}$  des précipitations qui est observée. Sur la période de 127 ans (1891-2018), les chutes de pluie ont augmenté de  $0,6 \text{ mm}/\text{an}$ , tandis que les chutes de neige ont diminué de  $1,5 \text{ mm}/\text{an}$  (en équivalent en eau), ce qui suggère des hivers plus doux avec plus de pluie et moins de neige.

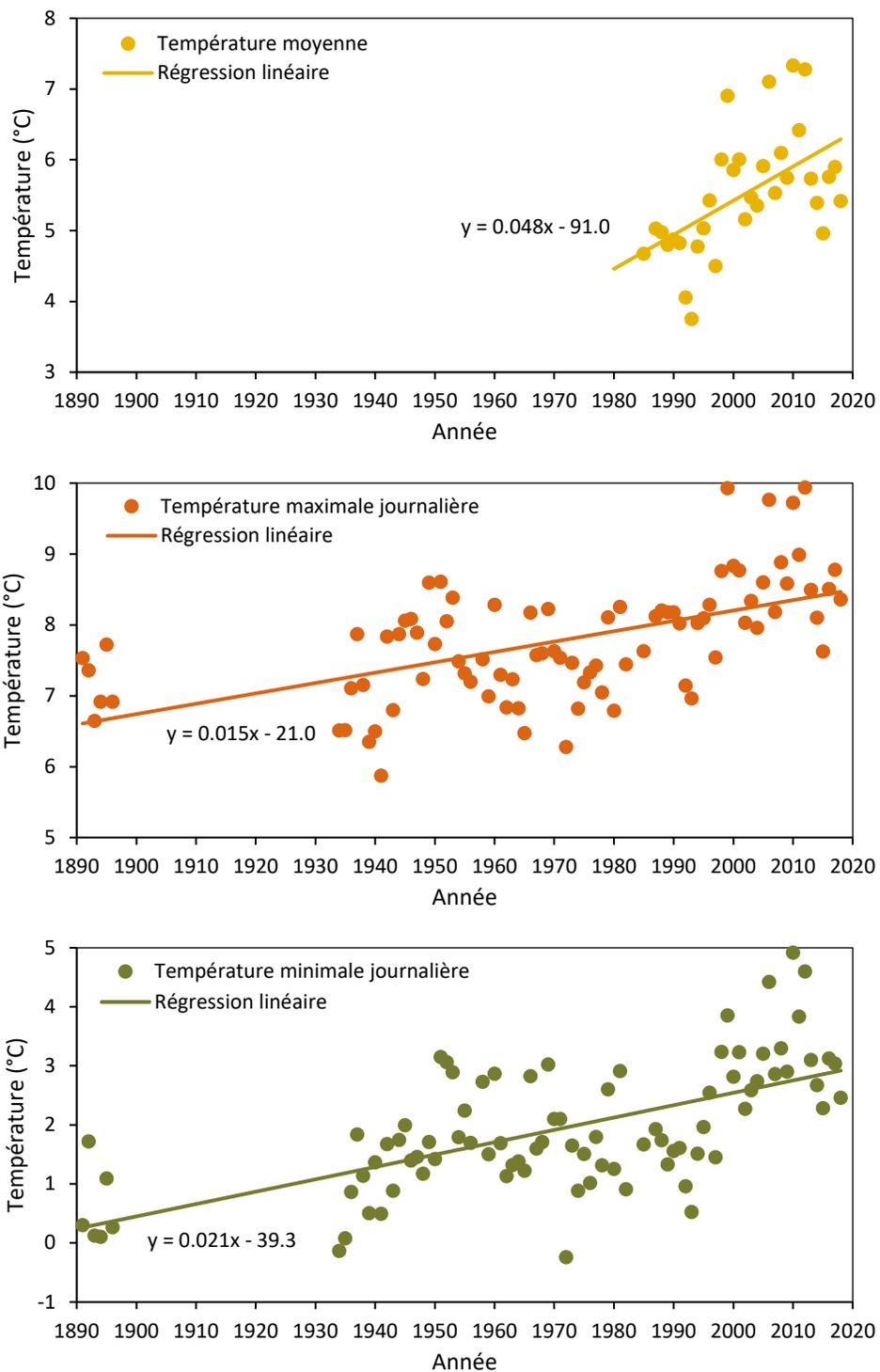


Figure 2.13 : Températures annuelles moyennes, minimales et maximales journalières de 1891 à 2018

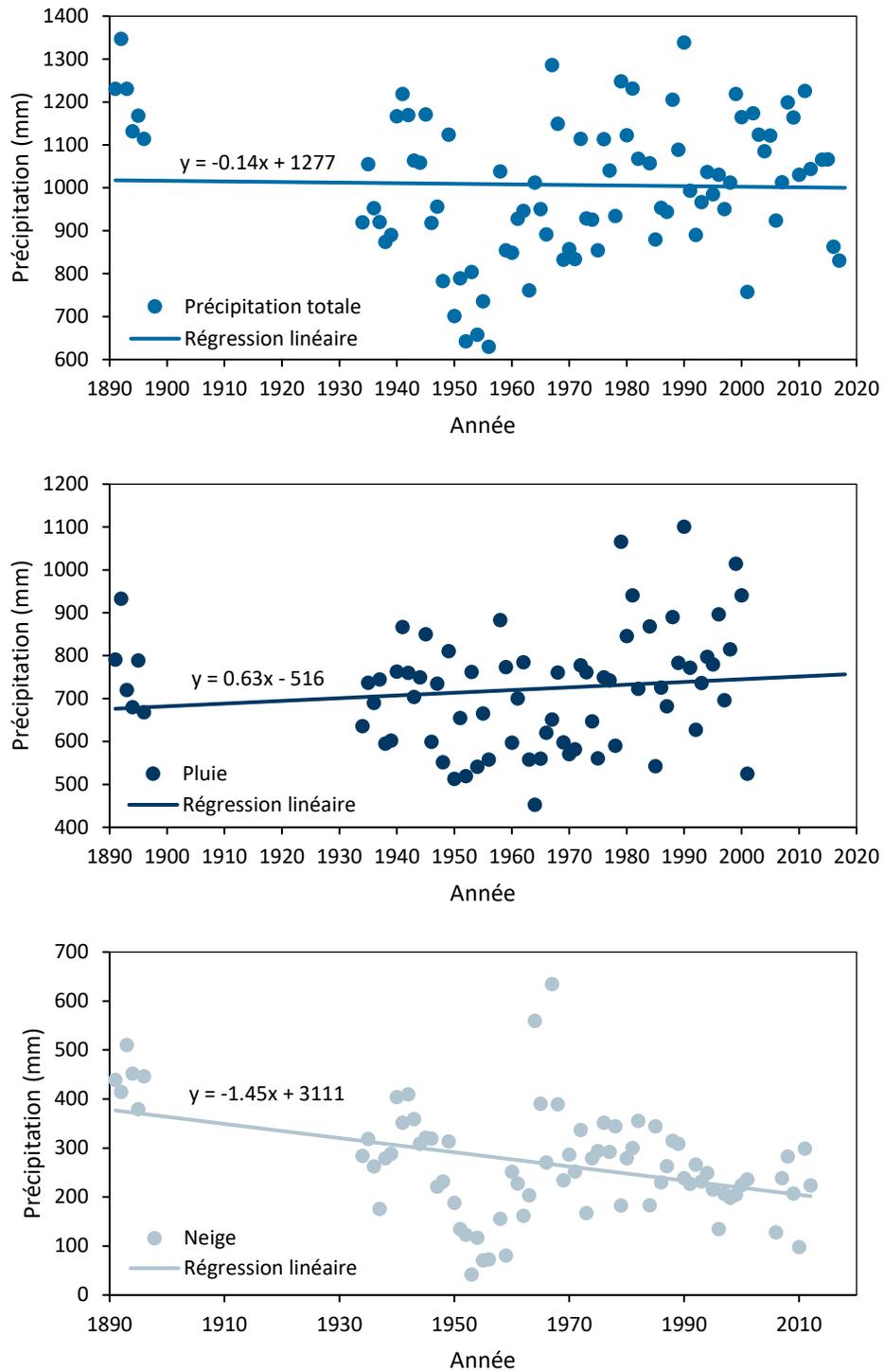


Figure 2.14 : Précipitations totales, chutes de pluie et chutes de neige annuelles de 1891 à 2018

La recharge est possiblement le processus lié aux eaux souterraines pouvant être le plus affecté par les changements climatiques sur le long terme. L'étude des changements des températures en hiver est d'importance, puisque des redoux peuvent signifier moins de chutes de neige et plus de précipitations liquides qui pourraient favoriser la recharge des aquifères. La Figure 2.15 illustre l'évolution des températures hivernales pour la période de 1891 à 2018 pour les stations combinées Cap-aux-Meules, Îles de la Madeleine et Îles de la Madeleine A. Pour les précipitations hivernales présentées à la Figure 2.16, les mesures pour trois années encore plus anciennes, soit 1872 à 1874, sont disponibles. Les moyennes hivernales des températures et les quantités de précipitations ont été calculées à partir des données de décembre à mars, soit les mois dont les normales mensuelles sont inférieures à 0°C.

Selon Bernatchez et coll. (2008), la hausse de température hivernale aurait été de 0,15°C/an entre 1985 et 2006, soit près du double de la hausse des températures moyennes annuelles. En intégrant les mesures jusqu'en 2018, la hausse serait plutôt de 0,08°C/an. En ne considérant que les 15 dernières années (2004-2018), on observe même une diminution des températures moyennes hivernales de 0,04°C/an. Depuis 1891, les hausses des températures journalières maximales et minimales en hiver sont similaires à celles pour l'année complète, soit respectivement de 0,01 et 0,02°C/an.

Lorsqu'on observe les précipitations hivernales depuis 1872, les précipitations totales semblent demeurer inchangées. Toutefois, les chutes de pluie ont augmenté à un rythme de 0,6 mm/an et les chutes de neige ont diminué de 0,8 mm/an (en équivalent en eau). Les hivers sont donc de plus en plus pluvieux et de moins en moins neigeux.

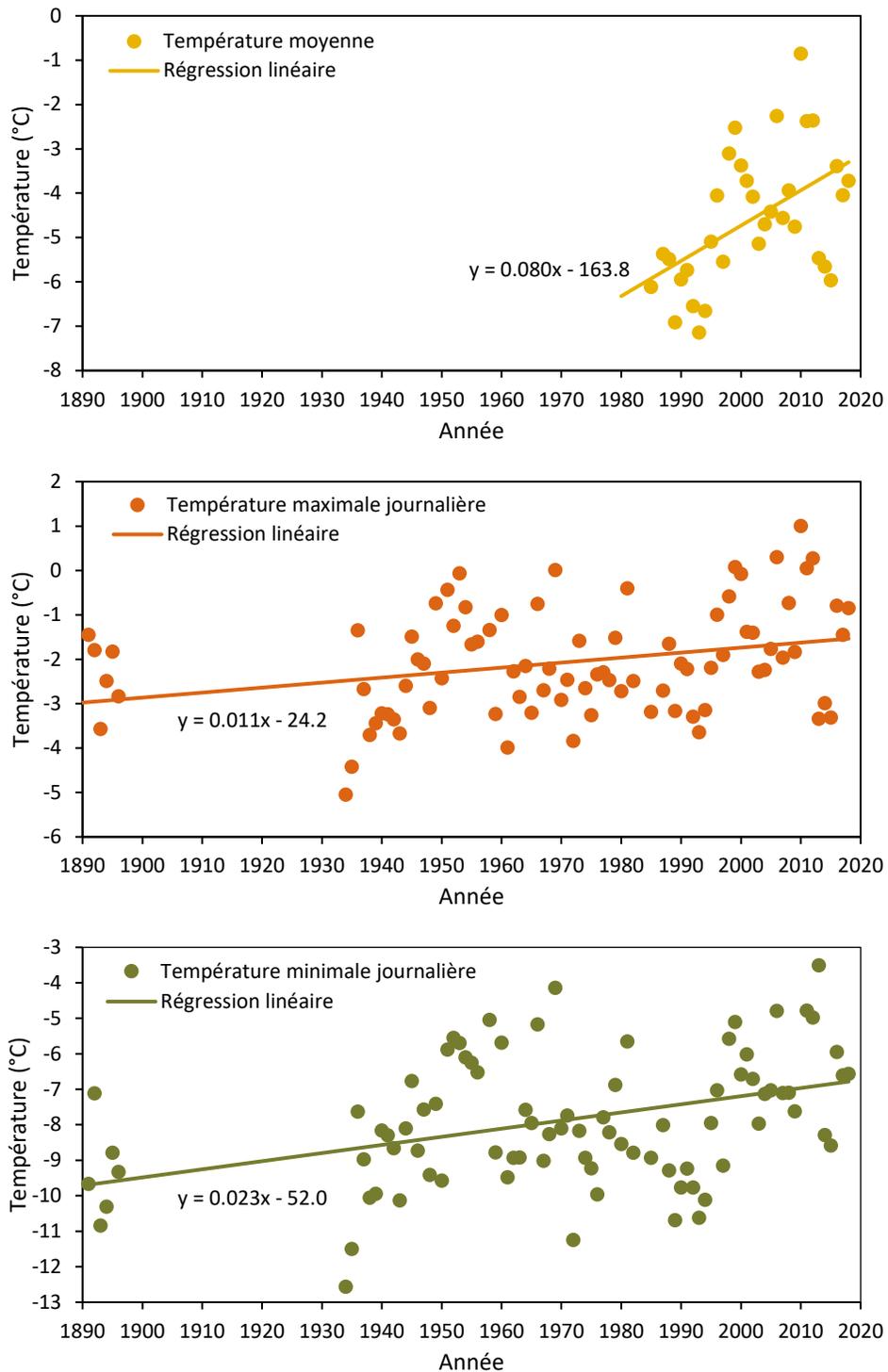


Figure 2.15 : Températures hivernales (décembre à mars) moyennes, minimales et maximales journalières de 1891 à 2018

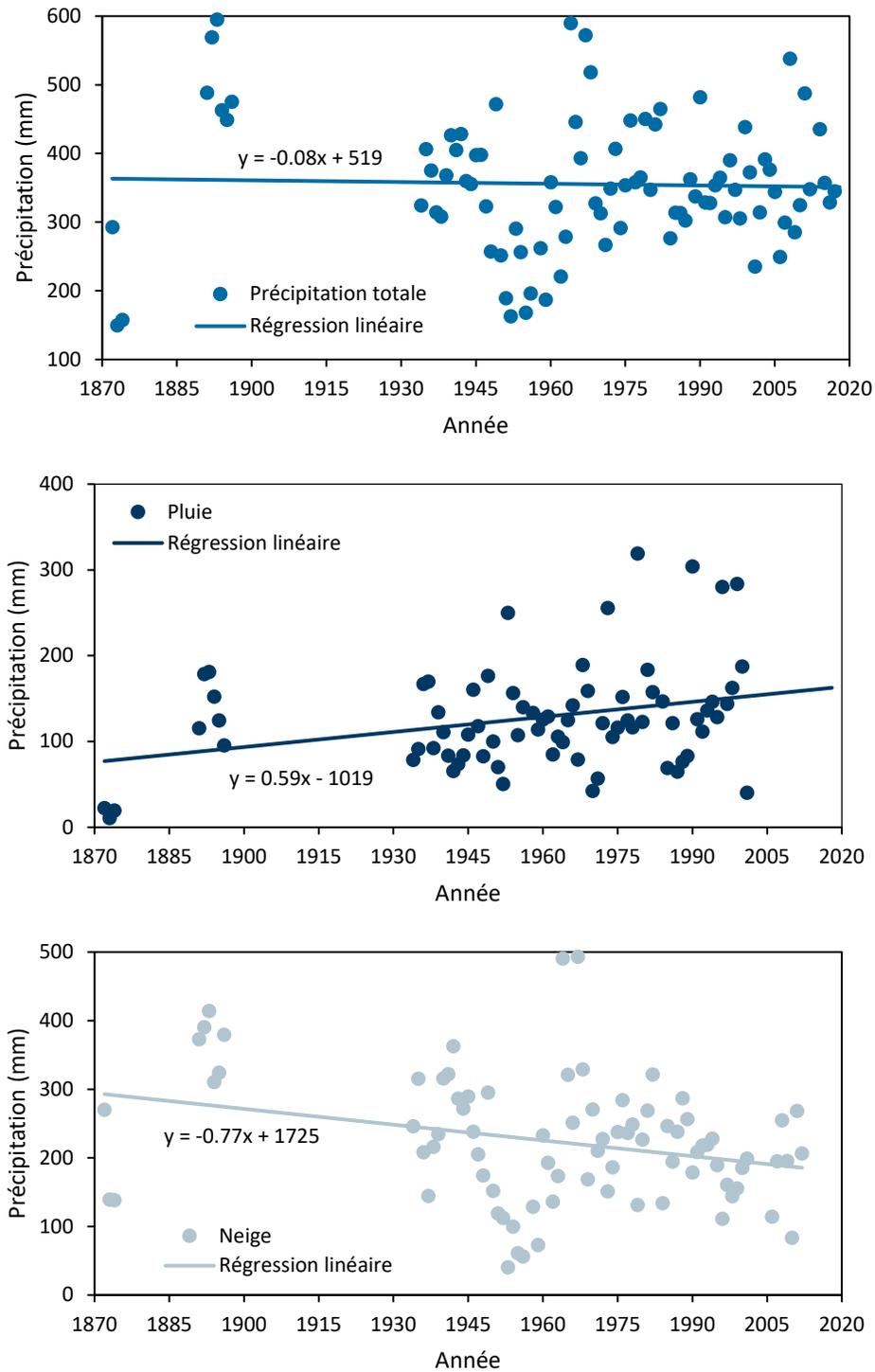


Figure 2.16 : Précipitations totales, chutes de pluie et chutes de neige hivernales (décembre à mars) de 1872 à 2018 (neige en équivalent en eau)

### 2.3.7.3 *Climat futur*

Ouranos a fourni 72 scénarios climatiques différents pour les 30 prochaines années (Charron, 2016). Ces scénarios sont issus de trois profils représentatifs d'évolution de concentration des gaz à effet de serre (ou RCP, de l'anglais « Representative Concentration Pathways »), soit 24 scénarios pour chaque RCP. Les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 ont été utilisés, respectivement à faibles, modérées et fortes émissions mondiales. Les données journalières extraites de chaque scénario sont les températures maximales et minimales, ainsi que les précipitations totales (en équivalent en eau pour les précipitations solides). La Figure 2.17 montre l'étendue des projections et la valeur médiane des 72 scénarios pour la période de projection de 2021 à 2050. Les différences entre les trois RCP n'étaient pas assez significatives pour les présenter.

Les projections sont comparées aux moyennes des données climatiques observées des 30 années les plus récentes aux stations météorologiques Îles de la Madeleine (ID de l'OMM 71710) et Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709). Pour la période de référence de 1989 à 2018, des valeurs moyennes annuelles de 8,4°C, 2,7°C et 1 048,4 mm sont obtenues respectivement pour les températures maximales journalières, les températures minimales journalières et les précipitations totales. Ces valeurs sont différentes de celles des normales climatiques de la période 1981-2010, car elles considèrent des années plus récentes.

De 2021 à 2050, les changements des températures maximales journalières s'étalent, selon les différents scénarios, de -0,03 à +0,10°C/an, avec une hausse médiane de 0,03°C/an. Cette hausse médiane est identique à celle obtenue durant la période de référence. Selon la médiane des scénarios, la moyenne annuelle attendue en 2050 serait de 9,4°C, représentant une hausse de 1,0°C depuis la période de référence.

Pour les températures minimales journalières, les prévisions varient de -0,02 à +0,11°C/an, avec une hausse médiane de 0,04°C/an. Cette dernière est inférieure à celle de 0,07°C/an obtenue durant la période de référence. La médiane des scénarios correspond à une hausse totale de 1,1°C sur 30 ans, comparativement à la période de référence, soit une moyenne annuelle de 3,8°C en 2050.

Enfin, pour les précipitations totales annuelles, une hausse médiane de 1,1 mm/an est attendue, avec des valeurs oscillant entre -4,7 et 6,0 mm/an. Pour la période de référence, c'est plutôt une baisse de 1,5 mm/an qui a été observée. D'ici 2050, selon la médiane des scénarios, les précipitations totales seraient augmentées à 1 081,9 mm, ce qui équivaldrait à une hausse de 33,5 mm depuis la période de référence.

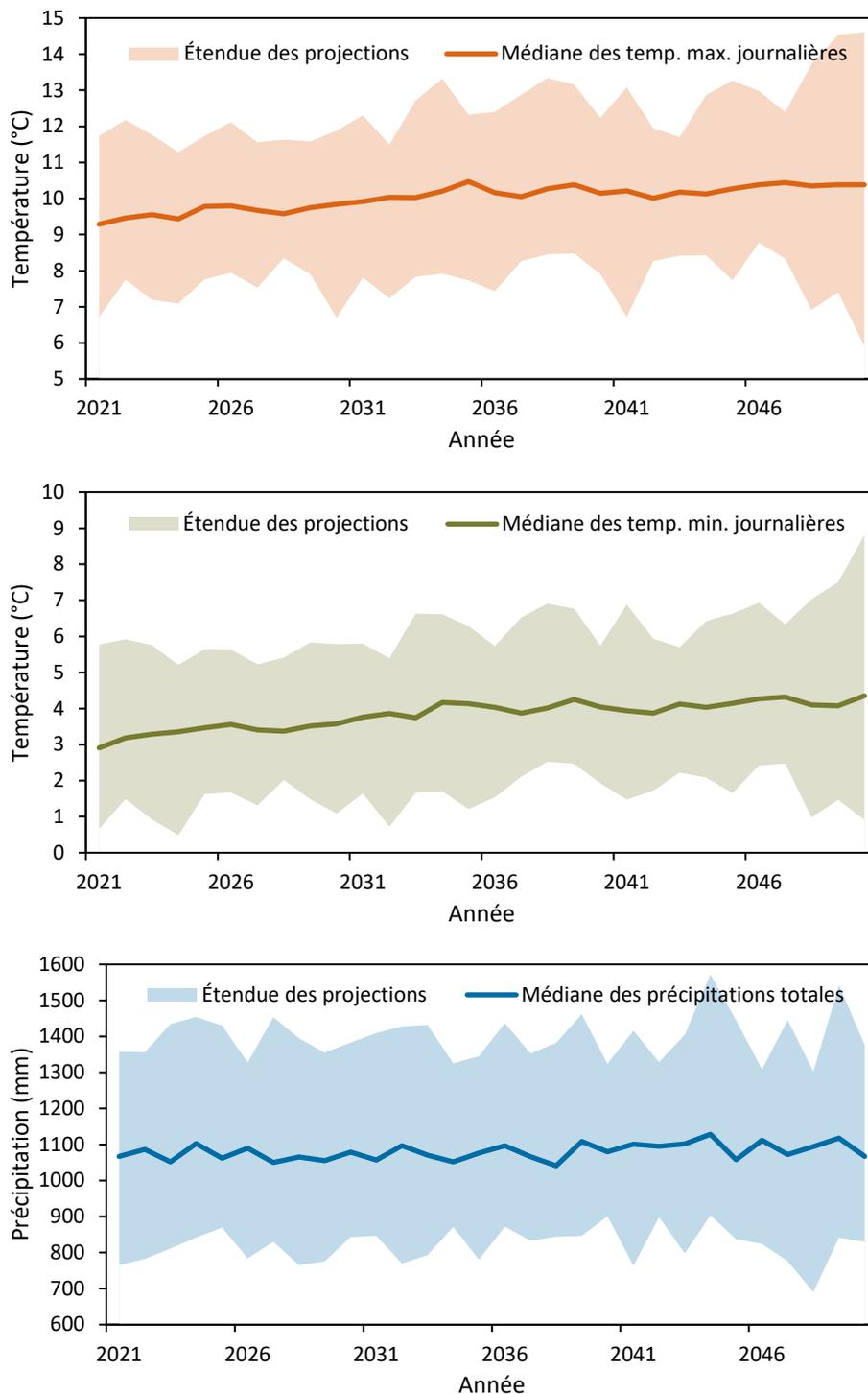


Figure 2.17 : Projections des températures minimales et maximales journalières, et des précipitations totales, pour 2021 à 2050, selon 72 scénarios climatiques

### 2.3.8 Niveau de la mer et marée

Les stations marégraphiques des îles de la Madeleine, opérées par Pêche et Océans Canada, sont localisées à la Figure 2.11. Une seule station marégraphique sur neuf est toujours en activité aujourd'hui. Il s'agit de la station Cap-aux-Meules (station no. 1970), située au port de Cap-aux-Meules. Des mesures depuis 1964 y sont disponibles, à fréquence horaire et journalière (Tableau 2.11). À l'exception de l'île aux Loups, la marée a été mesurée sur toutes les îles habitées du territoire d'étude un jour ou l'autre. Dans certains cas, le suivi n'a été effectué que durant quelques jours, et dans d'autres durant quelques années.

**Tableau 2.11 : Liste des stations marégraphiques**

Nom de la station	No. de la station	Année de début	Année de fin	Fréquence des données	Source des données
Aurigny	1961	1955	1955	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Cap-aux-Meules	1970	1964	-	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Étang-du-Nord	1990	1984	2001	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Grande-Entrée	1985	1984	1984	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Havre-Aubert	1964	1966	1966	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Île d'Entrée	1966	1985	2007	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Leslie	1987	1984	1984	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Old-Harry	1986	1985	1985	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada
Pointe-Basse	1981	1985	1985	Horaire et moyenne journalière	Pêches et Océans Canada

La Figure 2.18 illustre les variations des niveaux moyens, minimaux et maximaux journaliers, de mars 1964 à novembre 2019, de la station marégraphique Cap-aux-Meules (station no. 1970). La pente de la régression linéaire montre une hausse de 0,0111 mm/jour du niveau moyen de la mer, ce qui correspond à 4,05 mm/an. Cette valeur est similaire à la hausse du niveau marin relatif de 4,3 mm/an observée de 1964 à 2014 par Barnett et coll. (2017). Dû notamment à l'effet supplémentaire de la subsidence de la croûte terrestre (Section 5.1.2), cette remontée excède significativement la hausse globale moyenne de 1,9 mm/an mesurée entre 1961 et 2009 (Church et White, 2011).

Selon le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2019), l'expansion thermique des océans, la fonte des glaciers et les changements dans l'emmagasinement de l'eau sur terre entraîneraient une hausse globale du niveau moyen des mers entre 0,29 m et 1,10 m d'ici 2100, comparativement à la période 1986-2005. Si la tendance de 4,05 mm/an se maintenait durant les futures

années, en assumant que les phénomènes climatiques demeureraient constants, l'augmentation atteindrait 0,12 m en 2050 et 0,32 m en 2100. Selon Barnett et coll. (2017), le niveau moyen de la mer serait plutôt haussé de  $0,19 \text{ m} \pm 0,12 \text{ m}$  d'ici 2050. En considérant une accélération de ces phénomènes climatiques, Forbes et coll. (2004) estiment que l'élévation du niveau marin pourrait plutôt atteindre  $0,7 \text{ m} \pm 0,4 \text{ m}$  en 2100 à l'Île du Prince-Édouard. Des prédictions similaires, variant de  $1,00$  à  $1,05 \text{ m} \pm 0,48 \text{ m}$ , ont été établies pour les côtes du Nouveau-Brunswick pour le même horizon de temps (Daigle, 2012).

Les niveaux horaires mesurés au port de Cap-aux-Meules permettent de déterminer un niveau moyen à marée basse de 0,46 m, variant de -0,45 à 1,18 m, et un niveau moyen à marée haute de 1,16 m, variant de 0,36 à 2,38 m. Le régime est considéré comme microtidal, ceci représente un marnage journalier moyen de 0,70 m. Les niveaux de marée haute et de marée basse ont augmenté à un rythme similaire à celui du niveau moyen de la mer.

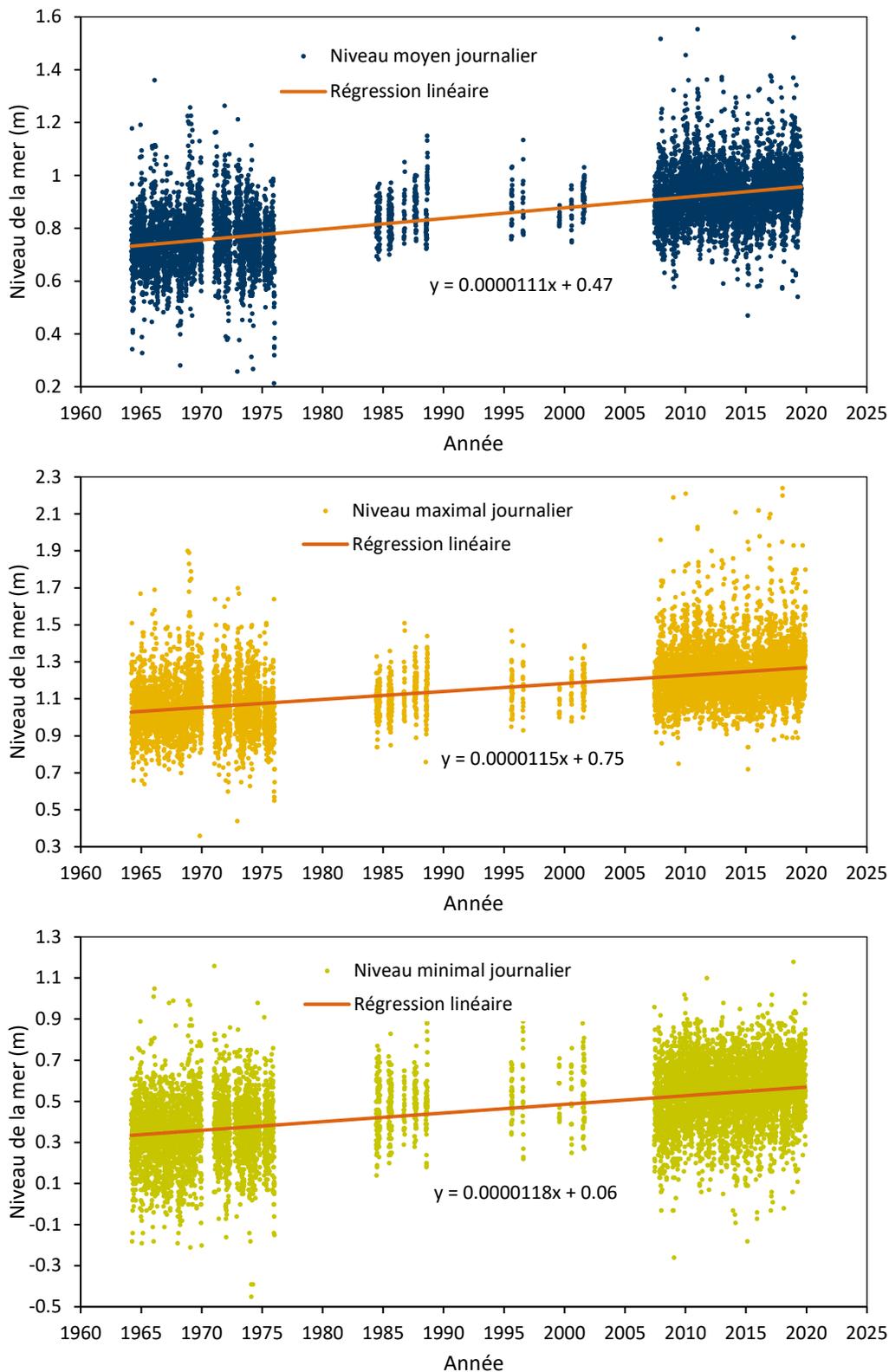


Figure 2.18 : Niveau moyen, maximal et minimal journalier de la mer de mars 1964 à novembre 2019 à la station marégraphique Cap-aux-Meules (station no. 1970)

Les altitudes du MAN et des éléments de terrain (ex. : margelle de puits) sont rapportées par rapport au niveau moyen des mers de la référence altimétrique CGVD28, communément appelé niveau géodésique. Le nivellement par arpentage s'effectue selon ce niveau géodésique. Toutefois, le niveau moyen de la mer aux îles de la Madeleine ne correspond pas nécessairement à cette référence. Les mesures de la station marégraphique Cap-aux-Meules (station no. 1970) permettent de calculer cette différence. Le niveau de référence marégraphique de cette station est situé 0,765 m en dessous du niveau moyen des mers du niveau géodésique CGVD28 (Labrecque, 2006). La moyenne des niveaux moyens journaliers enregistrés à la station pour la période de 2008 à 2018, qui correspondent aux années les plus récentes ayant au moins 300 jours de mesures, est de 0,933 m. Ainsi, le niveau moyen de la mer aux îles de la Madeleine serait situé à 0,168 m au-dessus du niveau moyen des mers de la référence altimétrique CGVD28 (Figure 2.19).

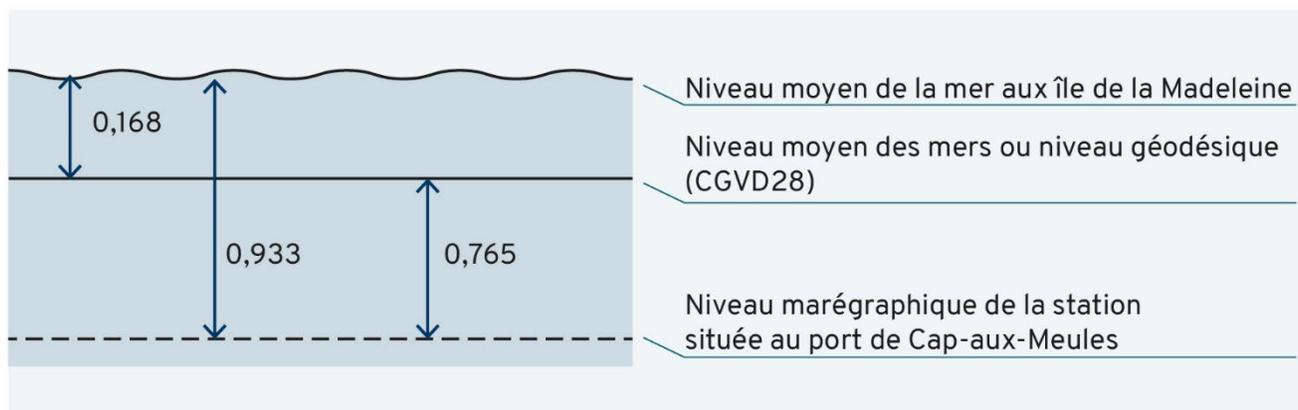


Figure 2.19 : Calcul du niveau moyen de la mer aux îles de la Madeleine

## 2.4 Milieu humain

### 2.4.1 Démographie

Au dernier recensement de 2016, la population des municipalités des Îles-de-la-Madeleine et de Grosse-Île était respectivement de 12 010 et 465 habitants, pour un total de 12 475 personnes pour la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine (Statistique Canada, 2017). En 2020, la population de cette dernière était estimée à 12 774 résidents permanents (Tableau 2.12) par l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) (ISQ, 2021b). La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine comprend la majorité des habitants, soit 12 301 (96 %). La municipalité de Grosse-Île, quant à elle, comprend 473 habitants, soit 4 % de la Communauté maritime. La densité de la population est plus importante pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, avec 69,5 habitants par km<sup>2</sup>, comparativement à 12,4 habitants par km<sup>2</sup> pour la municipalité de Grosse-Île. Au total, pour la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine, elle est de 59,3 km<sup>2</sup> selon Statistique Canada (2017).

En considérant la superficie totale de l'archipel de 190,5 km<sup>2</sup>, telle que déterminée à la Figure 2.2 de la Section 2.1, la densité de la population serait plutôt de 67,1 habitants par km<sup>2</sup>. La méthode de calcul de la superficie des terres émergées, de même que la source et la date des données cartographiques utilisées, peuvent influencer le résultat de la superficie, tel qu'expliqué à la Section 2.1. Elle serait de 215 km<sup>2</sup> en considérant les valeurs de population totale et de densité du Tableau 2.12.

**Tableau 2.12 : Démographie de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine**

Municipalité	Population <sup>1</sup>	Densité (habitant/km <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	12 301	69,5
Municipalité de Grosse-Île	473	12,4
<b>Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine</b>	<b>12 774</b>	<b>59,3</b>

<sup>1</sup> Selon l'estimation de la population de 2020 (ISQ, 2021b)

<sup>2</sup> Selon le dernier recensement de 2016 (Statistique Canada, 2017)

L'ISQ projette que, pour la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine, la population devrait augmenter de 2,0 % sur l'horizon 2020-2041, comparativement à une hausse de 10,6 % pour l'ensemble du Québec (ISQ, 2021b).

Le tourisme est un secteur d'activité économique prépondérant aux îles de la Madeleine. En 2018, on estime un total de 77 700 visiteurs, dont la majorité (60 000 visiteurs, 77 %) durant la saison estivale de juin à septembre (Tourisme Îles de la Madeleine, 2019). Dans ce dénombrement, aucune distinction n'est faite entre les touristes et les propriétaires de résidence secondaire. Les visiteurs restent en moyenne pour 9 nuitées, donc 10 jours (Tourisme Îles de la Madeleine, 2017). Tourisme Îles de la Madeleine (2021) s'attend à une hausse de la fréquentation touristique dans le futur.

### 2.4.2 Occupation du sol

La Carte 12 : Occupation du sol, en annexe électronique, et la Figure 2.20 présentent les utilisations du territoire par classe. Les données cartographiques en format matriciel, avec une résolution spatiale de 30 m, proviennent du MELCC. Elles correspondent à l'utilisation du territoire d'étude pour l'année 2018.

La classe d'occupation du sol dominante est la forêt, couvrant 59,7 km<sup>2</sup>, représentant 32 % du territoire (Tableau 2.13). Celle-ci est concentrée sur les buttes centrales qui sont moins développées. La classe de coupe et régénération, beaucoup moins importante, avec 1,6 km<sup>2</sup>, soit 1 % du territoire, se situe dans les mêmes secteurs. La classe anthropique est la deuxième en importance en termes de superficie, avec 42,2 km<sup>2</sup>, correspondant à 22 % du territoire. Cette classe inclue notamment les zones résidentielles, industrielles et commerciales, les réseaux routiers et de transmission d'énergie, les carrières et gravières, ainsi que l'aéroport à l'île du Havre aux Maisons. Cette occupation du sol se situe surtout sur les terrains plus plats des plateaux de grès. Le sol nu et lande est la troisième occupation couvrant le plus de territoire, soit 40,5 km<sup>2</sup>, équivalent à 22 % du territoire. Elle correspond principalement aux cordons dunaires, qui sont aussi occupés par les milieux humides, qui couvrent 21,9 km<sup>2</sup>, soit 12 % du territoire. La classe agricole, de 14,0 km<sup>2</sup>, soit 7 % du territoire d'étude, se localise à proximité des secteurs anthropiques, sur les plateaux de grès. Enfin, le milieu aquatique, excluant l'eau salée, fait 6,7 km<sup>2</sup>, ce qui correspond à 4 % du territoire.

**Tableau 2.13 : Superficie des classes d'occupation du sol**

Classe	Superficie (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)
Forestier	59,7	32,0
Anthropique	42,2	22,6
Sol nu et lande	40,5	21,7
Milieu humide	21,9	11,7
Agricole	14,0	7,5
Aquatique	6,7	3,6
Coupe et régénération	1,6	0,9

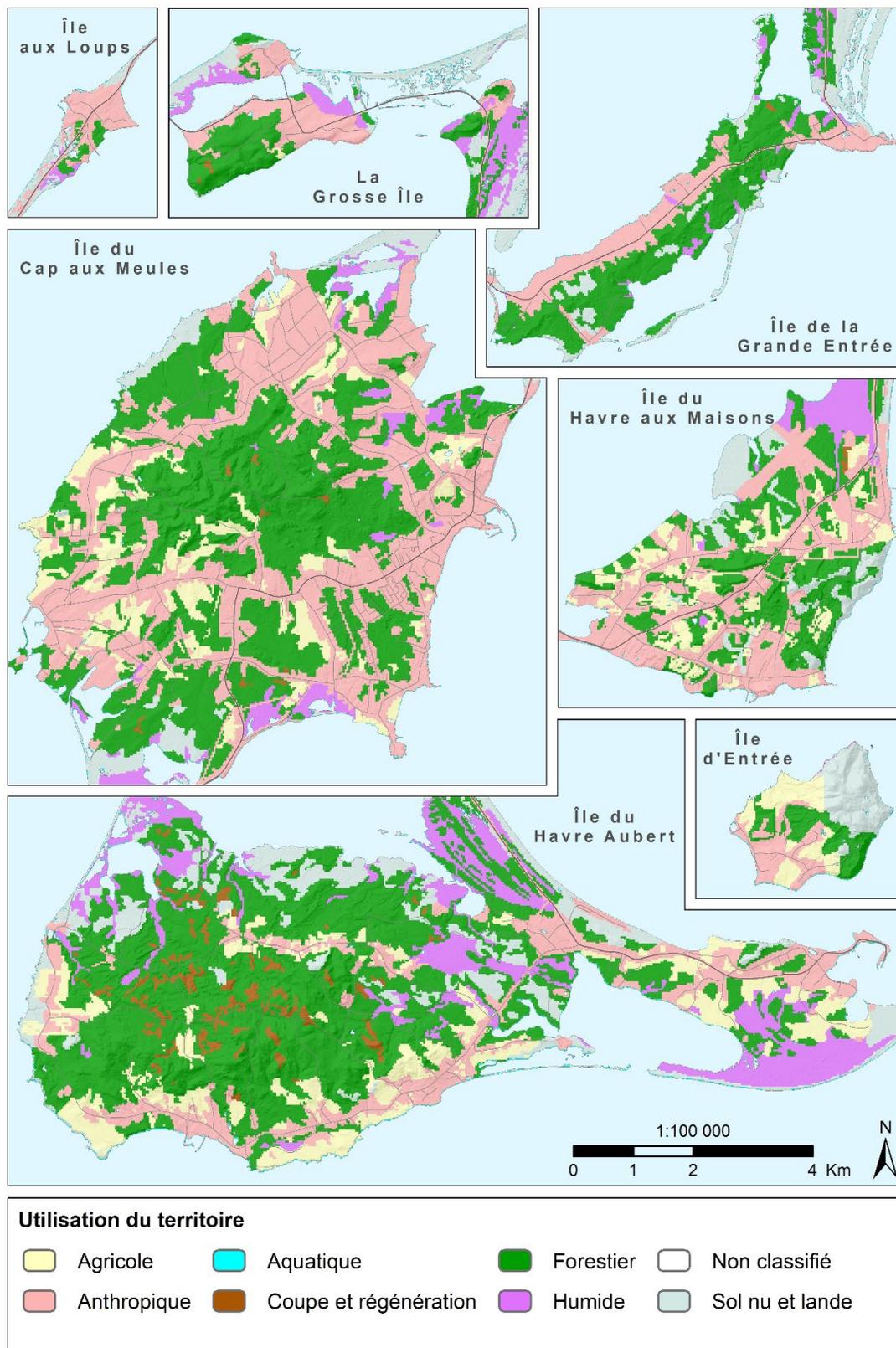


Figure 2.20 : Occupation du sol

### 2.4.3 Affectation du territoire

La Carte 13 : Affectation du territoire, en annexe électronique, et la Figure 2.21 présentent le zonage municipal du territoire d'étude, superposé par le périmètre urbain du Portrait provincial en aménagement du territoire du MAMH. En aménagement ou en urbanisme, l'affectation du territoire représente l'attribution à un territoire d'une utilisation, d'une fonction ou d'une vocation déterminée (MAMH, 2021). Elles indiquent formellement comment une municipalité ou une MRC entend utiliser son territoire. Dans le cadre de la présente étude, le zonage municipal, obtenu en format vectoriel pour 2020 de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et pour 2019 de la Municipalité de Grosse-Île, a été utilisé, car il est plus précis que les affectations du schéma d'aménagement.

La Carte 13 montre aussi les aires protégées du territoire d'étude, dont les données cartographiques en format vectoriel sont issues du Registre des aires protégées compilé par le MELCC. Une aire protégée est un territoire, en milieu terrestre ou aquatique, géographiquement délimité, dont l'encadrement juridique et l'administration visent spécifiquement à assurer à long terme la conservation de la nature ainsi que les services écosystémiques et les valeurs culturelles qui lui sont associés (MELCC, 2021a).

L'affectation de conservation domine, couvrant 82 km<sup>2</sup>, ce qui représente 40 % du territoire d'étude (Tableau 2.14). Cette affectation se retrouve en général sur les cordons dunaires et les milieux humides. L'affectation résidentielle est la deuxième en importance, occupant 44,0 km<sup>2</sup>, ce qui correspond à 22 % du territoire. Tel que mentionné à la Section 2.2, les habitations sont peu concentrées et sont réparties un peu partout sur les îles. La combinaison des affectations urbaine et de noyau villageois ne fait d'ailleurs que 4,7 km<sup>2</sup>, soit 3 % du territoire. Les trois affectations précédentes s'observent surtout sur les plateaux de grès. L'affectation forestière est la troisième affectation en importance, couvrant 35,6 km<sup>2</sup>, soit 18 % du territoire. Elle est concentrée sur les buttes centrales. L'affectation agricole n'est pas négligeable, avec 22,3 km<sup>2</sup> en superficie, ce qui représente 11 % du territoire. Elle avoisine les affectations résidentielles, sur les plateaux de grès. Les affectations industrielles, couvrant 6,3 km<sup>2</sup>, soit 3 % du territoire, sont présentes à plusieurs endroits, notamment dans le périmètre urbain de l'île du Cap aux Meules, aux sites des éoliennes et de la mine Seleine, sur le cordon dunaire au sud de la Grosse Île, et aux sites des usines de produits de la mer, près des ports de pêche. Les affectations publique, récréative et de villégiature complètent le portrait, occupant une superficie combinée de 7,2 km<sup>2</sup>, correspondant à 3 % du territoire.

Les aires protégées du territoire d'étude totalisent 30,8 km<sup>2</sup> en superficie. Elles concernent surtout la protection de la faune aviaire, en bordure de côte et dans le milieu aquatique marin. Le secteur de la Pointe de l'Est est ainsi presque entièrement protégé, sur 23,4 km<sup>2</sup>, en majorité par une réserve nationale de faune, mais aussi par un refuge faunique et des habitats d'espèces fauniques menacées ou vulnérables. Une autre vaste aire de concentration d'oiseaux aquatiques d'importance, de 3,8 km<sup>2</sup>, est délimitée tout juste au nord de la digue séparant les lagunes de la Grande Entrée et du Havre aux Maisons. Deux habitats d'espèces fauniques menacées ou vulnérables, d'une superficie combinée de 2,6 km<sup>2</sup>, sont situés le long du cordon dunaire à l'ouest de la baie du Havre aux Basques.

**Tableau 2.14 : Superficies des affectations pour chaque municipalité**

Zonage	Superficie (km <sup>2</sup> )			Proportion (%)
	Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	Municipalité de Grosse-Île	Communauté maritime (total)	
Conservation	50,3	31,7	82,0	40,6
Résidentiel	41,3	2,7	44,0	21,8
Forestier	32,6	3	35,6	17,6
Agricole	22,3	-	22,3	11,0
Industriel	4,9	1,4	6,3	3,1
Public	3,7	0,1	3,8	1,9
Noyau villageois	2,5	0,8	3,3	1,6
Villégiature	2,2	-	2,2	1,1
Urbain	1,4	-	1,4	0,7
Récréatif	1,0	0,2	1,2	0,6

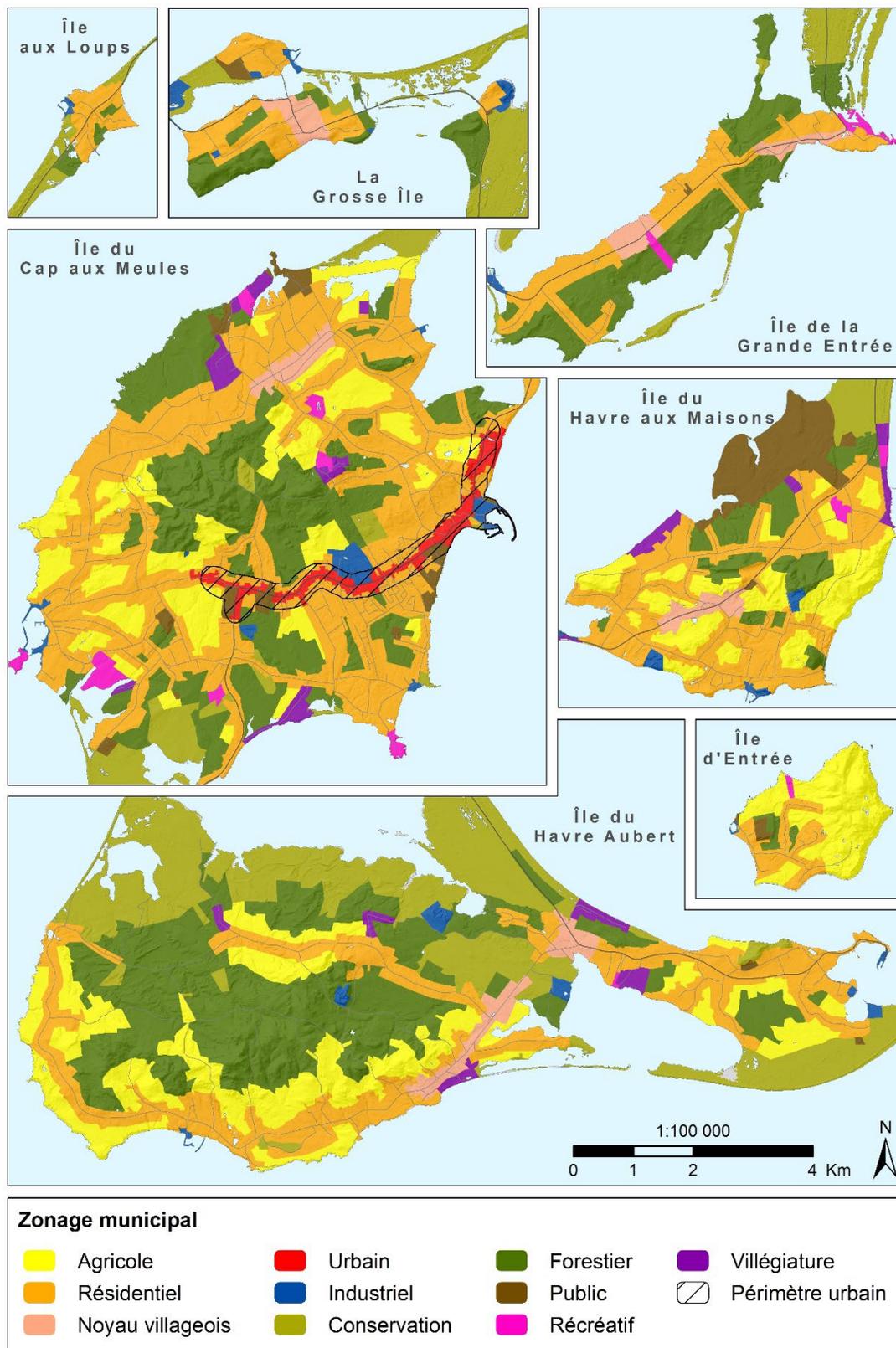


Figure 2.21 : Affectation du territoire

## 3 EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

### 3.1 Systèmes de distribution en eau potable

Aux îles de la Madeleine, l'unique source d'eau potable disponible et exploitée est l'eau souterraine. Cinq systèmes de distribution en eau potable, opérés par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, sont présents sur les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons, de la Grande-Entrée et d'Entrée. Les puits, les réservoirs et les conduites d'aqueduc sont localisés à la Carte 14 : Systèmes municipaux de distribution en eau potable et aires de protection des prélèvements, en annexe électronique, et à la Figure 3.1. Au total, ce sont 11 354 résidents permanents qui sont desservis par la municipalité (Tableau 3.1). Ces consommateurs se dénombrent comme suit : 6 643 à l'île du Cap aux Meules, 2 248 à l'île du Havre-Aubert, 1 921 à l'île du Havre aux Maisons, 507 à l'île de la Grande-Entrée et 35 à l'île d'Entrée. Le reste des 12 774 résidents permanents des îles de la Madeleine (Section 2.4.1), soit 1 420 personnes, s'approvisionnent en eau potable à partir de puits résidentiels privés. Ceci inclut l'ensemble de la population de la Municipalité de Grosse-Île.

Des réservoirs sont présents pour tous les systèmes de distribution, excluant celui de l'île d'Entrée. L'eau est acheminée par gravité depuis les réservoirs à l'ensemble des réseaux d'aqueduc, à part sur l'île de la Grande Entrée où un pompage est nécessaire. Les réseaux d'aqueduc font respectivement 115, 48, 38, 6,5 et 0,5 km de long pour les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons, de la Grande Entrée et d'Entrée (Figure 3.1).

Les eaux prélevées des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert et du Havre aux Maisons sont suffisamment de bonne qualité naturelle pour ne nécessiter aucun traitement, pas même une désinfection. Une désinfection à base d'hypochlorite de sodium est effectuée à l'usine de traitement de l'île de la Grande Entrée. Un système d'adoucisseur et de résine anionique, notamment pour prévenir des concentrations élevées en nitrites-nitrates dans l'eau distribuée, est relié au puits HQ-2 de l'île d'Entrée.

**Tableau 3.1 : Systèmes de distribution en eau potable municipaux**

Île	Nombre de puits en opération	Nombre de puits non opérés	Population totale desservie
Cap aux Meules	18	7	6 643
Grande Entrée	9	-	507
Havre aux Maisons	6	-	1 921
Havre Aubert	4	-	2 248
Entrée	1	-	35
<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>7</b>	<b>11 354</b>

#### 3.1.1 Puits municipaux

La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine exploite l'eau souterraine à l'aide de 38 puits tubulaires actuellement en opération pour alimenter ses réseaux de distribution en eau potable (Tableau 3.1). Ceux-ci sont localisés sur la Carte 14 et à la Figure 3.1. Dix-huit (18) de ces puits se situent sur l'île du Cap aux Meules, neuf sur l'île de la Grande-Entrée, six sur l'île du Havre aux Maisons, quatre sur l'île du

Havre Aubert et un seul sur l'île d'Entrée. Sept autres puits sont installés sur l'île du Cap aux Meules, mais ne sont pas opérés à ce jour, car ils ne sont pas connectés au réseau de distribution. Au total, la municipalité possède donc 45 puits d'approvisionnement, en opération ou non.

Les puits municipaux exploitent tous un aquifère de roc sédimentaire, composé majoritairement de grès poreux et perméable, appartenant en majeure partie à l'unité géologique du Membre de l'Étang-des-Caps et dans une moindre mesure du Membre de l'Étang-du-Nord (Figure 3.1). La géologie du roc est présentée en détail à la Section 5.1.1. Les descriptions stratigraphiques sont détaillées pour 37 des 45 puits municipaux à l'Annexe 1.

Le Tableau 3.2 résume les caractéristiques principales de l'aménagement des puits. Les schémas d'aménagement en coupe des puits, disponibles pour 30 des 45 puits municipaux, sont aussi présentés à l'Annexe 1. Ils sont pour la plupart issus des rapports de forage originaux (références indiquées au Tableau 3.2). Quelques-uns proviennent aussi de travaux récents d'inspection par caméra (Arrakis, 2019). Les 12 puits forés durant la période 1960-1970, de même que pour deux autres puits datant des années 1990, ne possèdent pas de schémas et plusieurs de leurs caractéristiques d'aménagement demeurent inconnues. Les rapports originaux de 10 de ces puits fournissent du moins la description des matériaux géologiques rencontrés lors des forages. Aucune information n'est disponible sur l'aménagement de trois autres puits, dont le puits PU4 du secteur de Fatima sur l'île du Cap aux Meules, pour lequel même la date de forage et la profondeur du puits sont inconnues.

La profondeur des puits, tous tubulaires, oscille entre 25 et 100 m, avec des diamètres variant de 15 à 25 cm (6 à 10 po). En général, les puits des îles du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée sont moins profonds que les autres. Parmi les 30 puits dont les caractéristiques d'aménagement des puits sont connues, 19 sont ouverts au roc, avec des tubages étanches variant de 5 à 40 m de profondeur. Malgré le fait qu'ils exploitent l'eau du socle rocheux, 11 puits sont crépinés, parfois jusqu'à six sections crépinées alternant avec un tubage étanche.

À l'exception de l'île de la Grande Entrée, l'information recueillie dans le cadre du projet n'a pu permettre d'identifier les dates exactes de mise en service des systèmes de distribution en eau potable. Elles peuvent toutefois être estimées à l'aide des années de forage des puits (Tableau 3.2). Le système le plus ancien est celui de l'île du Cap aux Meules, ayant démarré vers 1963 avec les puits PU9 et PU10 situés dans le secteur de Cap-aux-Meules, à proximité de l'usine thermique. Le réseau a ensuite été étendu à deux reprises, par l'aménagement des puits PU1 à PU8 dans les secteurs de l'Étang-du-Nord et de Fatima vers 1975, puis l'aménagement des puits P1 à P8 dans les mêmes secteurs vers 1993. Sept nouveaux puits ont été forés en 2009 (EDN-09-02PP à EDN-09-04PP et FAT-09-01PP à FAT-09-04PP), mais n'ont toujours pas été mis en service.

Le système de distribution de l'île du Havre Aubert a été initié quelques années après celui de l'île du Cap aux Meules, avec les puits P1 et P2 qui datent de 1969. Deux puits, P3 et P4, ont été ajoutés en 1998. Le réseau de l'île du Havre aux Maisons a été entamé à la même époque, avec la mise en place des puits P1 et P2 en 1970. Ont suivi deux phases de développement, par l'ajout des puits P3 et P4 en 1993, puis les puits HAM-09-01PP et HAM-09-02PP en 2009. Le système de distribution en eau potable de l'île de la Grande Entrée est quant à lui beaucoup plus récent. Ses neuf puits, forés entre 2006 et 2009, ont été mis en service en 2013. Enfin, l'unique puits de l'île d'Entrée a été installé en 1989.

**Tableau 3.2 : Aménagement des puits d'eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine**

Île	Nom du puits	Profondeur du puits (m)	Élévation du tubage (m)	Hauteur hors sol du tubage (m)	Longueur du tubage (m)	Diamètre du tubage (m)	Ouverture du puits	Année de forage	Source originale
Cap aux Meules	PU1 <sup>2</sup>	64,01	20,20	n.d.	n.d.	0,25	n.d.	1975	Compagnie Internationale des Eaux Ltée (1975)
	PU2 <sup>2</sup>	71,63	29,30	n.d.	n.d.	0,25	n.d.		
	PU3 <sup>1</sup>	77,30	21,90	n.d.	n.d.	0,25	Ouvert au roc		
	PU4 <sup>4</sup>	n.d.	17,30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	PU5 <sup>4</sup>	57,00	27,20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1975	n.d.
	PU6 <sup>4</sup>	n.d.	24,30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
	PU7 <sup>2</sup>	76,10	28,60	n.d.	n.d.	0,25	n.d.	1975	Compagnie Internationale des Eaux Ltée (1975)
	PU8 <sup>2</sup>	71,63	26,10	n.d.	n.d.	0,25	n.d.		
	PU9 <sup>2</sup>	76,20	14,70	n.d.	15,80	n.d.	n.d.	1963	n.d.
	PU10 <sup>2</sup>	76,20	13,50	n.d.	17,40	n.d.	n.d.		
	P1 <sup>1</sup>	63,70	37,50	1,00	7,20	0,15	Crépiné	1993	Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1993)
	P2 <sup>1</sup>	61,00	30,10	1,00	4,90	0,15	Crépiné		
	P3 <sup>1</sup>	39,60	16,10	0,80	5,60	0,15	Crépiné		
	P4 <sup>1</sup>	45,70	24,00	1,07	5,20	0,15	Crépiné		
	P5 <sup>1</sup>	57,00	30,90	0,97	4,90	0,15	Crépiné		
	P6 <sup>1</sup>	92,70	42,10	1,00	4,60	0,15	Crépiné		
	P7 <sup>1</sup>	62,20	41,02	1,00	5,10	0,15	Crépiné		
	P8 <sup>1</sup>	48,80	33,40	1,04	6,10	0,15	Crépiné		
	EDN-09-02PP <sup>1;5</sup>	61,60	30,92	0,90	38,60	0,20	Ouvert au roc	2009	Groupe Madelin'Eau (2010a)
	EDN-09-03PP <sup>1;5</sup>	68,00	36,26	0,91	32,33	0,20	Ouvert au roc		
EDN-09-04PP <sup>1;5</sup>	43,20	15,53	0,96	24,48	0,20	Ouvert au roc			
FAT-09-01PP <sup>1;5</sup>	52,40	33,45	0,94	30,57	0,20	Ouvert au roc	2009	Groupe Madelin'Eau (2010b)	
FAT-09-02PP <sup>1;5</sup>	61,60	33,81	0,90	30,57	0,20	Ouvert au roc			
FAT-09-03PP <sup>1;5</sup>	55,50	33,97	0,90	30,56	0,20	Ouvert au roc			
FAT-09-04PP <sup>1;5</sup>	49,40	22,44	0,97	25,68	0,20	Ouvert au roc			

**Tableau 3.2 : Aménagement des puits d'eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (suite)**

Île	Nom du puits	Profondeur du puits (m)	Élévation du tubage (m)	Hauteur hors sol du tubage (m)	Longueur du tubage (m)	Diamètre du tubage (m)	Ouverture du puits	Année de forage	Source originale
Havre Aubert	P1 <sup>2</sup>	76,20	16,50	n.d.	13,10	0,30	n.d.	1969	Compagnie Internationale des Eaux Ltée (1969)
	P2 <sup>2</sup>	76,20	18,50	n.d.	13,10	0,30	n.d.		
	P3 <sup>4</sup>	77,30	34,10	0,52	n.d.	n.d.	n.d.	1998	Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1998)
	P4 <sup>4</sup>	67,70	31,20	0,65	n.d.	n.d.	n.d.		
Havre aux Maisons	P1 <sup>2</sup>	30,48	21,40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1970	Consultants H.G.E. Inc. (1987)
	P2 <sup>2</sup>	30,78	22,40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
	P3 <sup>3</sup>	35,00	20,40	0,50	22,11	0,15	Crépiné	1993	Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée (1993)
	P4 <sup>3</sup>	36,30	19,30	0,50	23,41	0,15	Crépiné		
	HAM-09-01PP <sup>1</sup>	43,30	12,04	1,00	19,26	0,20	Ouvert au roc	2009	Groupe Madelin'Eau (2010c)
	HAM-09-02PP <sup>1</sup>	48,80	20,37	0,93	28,14	0,20	Ouvert au roc		
Grande Entrée	FE-06-03 <sup>1</sup>	32,00	12,57	0,43	6,09	0,15	Ouvert au roc	2006	Groupe Madelin'Eau (2007)
	FE-06-04 <sup>1</sup>	37,80	16,91	0,50	6,09	0,15	Ouvert au roc		
	FE-06-05 <sup>1</sup>	32,00	9,72	0,55	6,09	0,15	Ouvert au roc		
	FP-06-06 <sup>1</sup>	25,00	7,81	0,58	19,20	0,15	Crépiné		
	GE-09-01A <sup>1</sup>	41,20	21,31	0,76	29,72	0,15	Ouvert au roc	2009	Groupe Madelin'Eau (2009)
	GE-09-02 <sup>1</sup>	42,10	24,32	0,63	9,10	0,15	Ouvert au roc		
	GE-09-03 <sup>1</sup>	42,10	10,69	0,62	17,50	0,15	Ouvert au roc		
	GE-09-04 <sup>1</sup>	41,50	13,78	0,72	17,50	0,15	Ouvert au roc		
GE-09-05B <sup>1</sup>	42,10	18,72	0,85	17,70	0,15	Ouvert au roc			
d'Entrée	HQ-2 <sup>1</sup>	22,55	10,00	0,55	6,68	0,15	Ouvert au roc	1989	ADS associés Ltée (1989)

<sup>1</sup> Un schéma en coupe est disponible pour ce puits à l'Annexe 1 et une description stratigraphique est disponible à l'Annexe 1.

<sup>2</sup> Aucun schéma d'aménagement en coupe n'est disponible pour ce puits, mais une description stratigraphique est disponible à l'Annexe 1.

<sup>3</sup> Un schéma d'aménagement en coupe est disponible pour ce puits à l'Annexe 1, mais aucune description stratigraphique n'est disponible.

<sup>4</sup> Aucun schéma d'aménagement en coupe n'est disponible pour ce puits, ni aucune description stratigraphique.

<sup>5</sup> Puits non opéré.

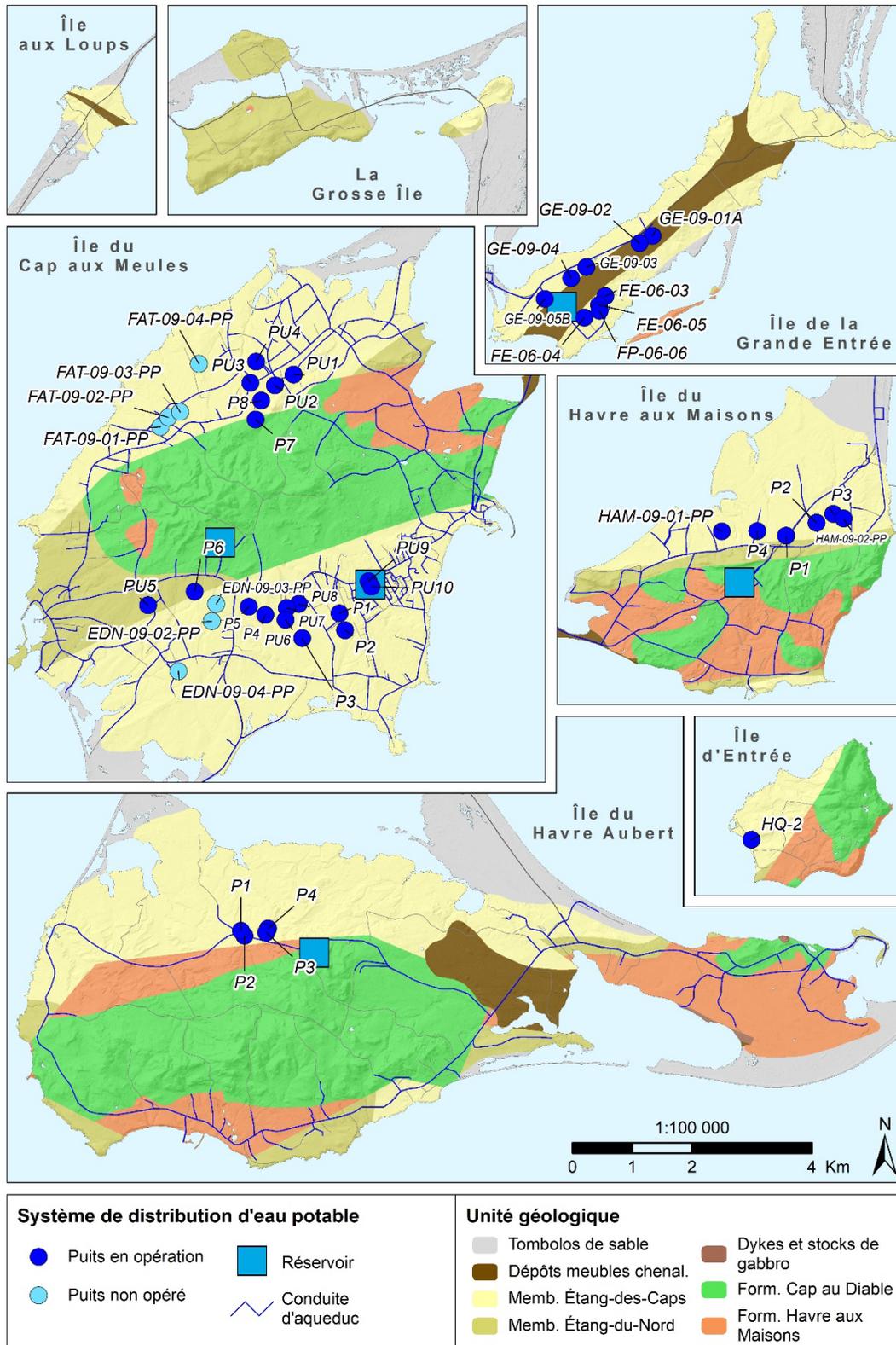


Figure 3.1 : Systèmes de distribution d'eau potable et prélèvements municipaux (la géologie du roc en fond de carte est présentée en détail à la Section 5.1.1)

### **3.1.2 Systèmes de contrôle et suivi**

Pour assurer une gestion durable de l'eau potable, des contraintes établies par des études hydrogéologiques et exigées par les autorisations de prélèvement du MELCC sont applicables. Celles-ci visent notamment à éviter le dénoisement des pompes, la surexploitation des aquifères et la salinisation des puits. Par exemple, des débits d'exploitation journaliers maximaux sont à respecter pour la plupart des puits. Pour le système de distribution de l'île de la Grande Entrée, des contraintes particulières supplémentaires concernent des volumes mensuels maximaux combinant les puits de chaque flanc de l'île (flanc nord et flanc sud). Des seuils d'abaissement du niveau piézométrique dans les puits sont aussi recommandés ou exigés pour le désamorçage automatique des pompes.

Des systèmes de télémétrie viennent appuyer la gestion des puits municipaux et des systèmes de distribution. Les systèmes ayant été programmés par des fournisseurs distincts, les interfaces d'utilisation et formats de sortie des données diffèrent d'une île à l'autre. Le puits HQ-2 de l'île d'Entrée fait exception et ne bénéficie pas d'un suivi télémétrique, étant donné le faible nombre d'habitants approvisionnés.

À chaque puits d'alimentation, les paramètres suivants sont mesurés et enregistrés :

- le débit d'exploitation;
- le niveau d'eau;
- la conductivité électrique;
- la température;
- le pH.

La gestion des débits prélevés par les puits est automatisée en fonction de consignes et alarmes programmées dans les systèmes de télémétrie qui peuvent être modifiés manuellement par l'utilisateur. Celles-ci concernent une variété de paramètres, par exemple des alarmes de bas niveau pour le désamorçage de la pompe et accompagné d'un seuil de réamorçage, de bas et haut débit instantané, de haute et très haute conductivité électrique et de haute température. Lorsque le niveau d'eau dans le puits s'abaisse au point d'atteindre le seuil de désamorçage, par exemple par un pompage excessif, la pompe s'arrête automatiquement et redémarre dès que le niveau d'eau réatteint le niveau de réamorçage. La même opération se produit lorsque le seuil de haute conductivité est atteint, afin de réduire le risque d'introduire d'eau salée dans le puits. Les débits instantanés minimal et maximal brident la pompe à fournir plus ou moins d'eau. Aucune contrainte de débit maximal journalier ou de durée de pompage (ex. en heures par jour) n'est automatisée.

### 3.1.3 Débits d'exploitation

Les débits d'exploitation journaliers des puits municipaux, à l'exception du puits HQ-2 de l'île d'Entrée, ont été compilés à partir des données fournies des systèmes de télémétrie pour la période de 2002 à 2020. Bien que la télémétrie soit utilisée par la municipalité depuis les années 1990, les données antérieures n'étaient pas disponibles faute de sauvegarde. Les rapports de pompage journaliers provenant des systèmes de télémétrie sont parfois incohérents, erronés ou absents, et ne sont pas toujours enregistrés dans un même format. Les valeurs aberrantes s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne de la distribution des débits pour chaque puits ont été écartées. Pour les années les plus récentes, lorsque les données étaient manquantes ou inutilisables, les volumes mensuels prélevés déclarés par la municipalité au MELCC de 2014 à 2019 ont permis de combler les trous dans les chroniques de débit.

L'historique des pompages sur l'île du Cap aux Meules a été reconstitué à l'aide de rapports journaliers s'échelonnant du 17 mars 2002 au 2 avril 2018 et du 6 mai 2018 au 24 juin 2020. Pour l'île du Havre Aubert, deux types de rapports journaliers différents, allant du 22 mars 2002 au 2 avril 2018 et du 30 janvier 2017 au 13 septembre 2020, ont été utilisés. Une mise à jour du système de télémétrie explique les deux formats de rapports disponibles. La même situation s'applique pour l'île du Havre aux Maisons, où deux types de rapports journaliers différents, s'échelonnant du 20 mars 2002 au 2 avril 2018 et du 11 juillet 2014 au 1<sup>er</sup> octobre 2020, ont permis de reconstituer les débits d'exploitation. Enfin, les mesures de pompages de l'île de la Grande Entrée proviennent de rapports journaliers du 1<sup>er</sup> juin 2014 au 31 octobre 2019.

Les chroniques journalières reconstituées depuis 2002 sont présentées graphiquement à l'Annexe 2 pour chaque puits d'alimentation. De ces chroniques journalières, on remarque une grande variabilité quotidienne des pompages. Aucune tendance temporelle ne semble se dégager. Un débit de 0 m<sup>3</sup>/jour est une mesure réelle et indique qu'aucun pompage n'a été effectué ce jour-là. Malgré les corrections apportées, certaines données sont toujours manquantes, ce qui explique la présence de trous dans les chroniques de pompage. On remarque une absence de données de 2003 à 2013 pour les puits P3 et P4 de l'île du Havre Aubert. Les puits HAM-09-01-PP et HAM-09-01-02-PP ont été mis en opération en 2014. Les puits PU5 de l'île du Cap aux Meules, P4 de l'île du Havre aux Maisons et GE-09-03 de l'île de la Grande Entrée ne sont plus en fonction depuis 2014, 2014, et 2015, respectivement. Pour le puits P4 de l'île du Havre aux Maisons, des travaux de décolmatage ont été réalisés récemment (Arrakis, 2021) et le puits a été remis en opération en 2022.

Le Tableau 3.3 présente, pour chacun des puits municipaux, le débit d'exploitation moyen annuel pour la période de 2002 à 2020. Ces valeurs ont été utilisées dans le cadre de cette étude, notamment pour la calibration des modèles numériques d'écoulement de l'eau souterraine (Section 7) et pour l'évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux (Section 9.1.1). Les débits moyens annuels entre 2014 et 2020 sont aussi rapportés au Tableau 3.3. Ces derniers ont été employés entre autres pour comparer avec les débits maximaux simulés qu'il est possible de prélever sans risque d'intrusion d'eau salée dans les puits (Section 9.1.2). À noter que pour les puits de l'île de la Grande Entrée, une seule valeur est associée aux deux périodes, car le réseau de distribution est récent et les mesures ne sont disponibles que depuis 2014.

On constate qu'en général les débits pour les deux périodes ne sont pas extrêmement variables. Dans l'ensemble, pour les îles autres que de la Grande Entrée, 11 puits ont subi une hausse de leur débit d'exploitation de plus de 5 % dans les années les plus récentes (2014-2020) comparativement à la plus longue période (2002-2020). À l'inverse, une baisse du débit de plus de 5 % s'observe pour 10 puits. Plusieurs de ces derniers ont depuis bénéficiés de travaux de décolmatisation pour augmenter leur capacité (Arrakis, 2021). Le puits P2 de l'île du Cap aux Meules présente la hausse la plus marquée de 85 %, suivi des puits P8, P3 et PU10 de la même île, ainsi que le puits P3 de l'île du Havre aux Maisons, qui montrent tous des hausses de 30 % ou plus. La baisse la plus marquée, de 39 %, est observée pour les puits P5 de l'île du Cap aux Meules. C'est le seul puits dont la baisse est de plus de 30 %. Six puits n'ont subi aucun changement ou celui-ci est de moins de 5 %. Aucun pompage ou presque n'a eu lieu dans les puits P4 de l'île du Havre aux Maisons et GE-09-03 de l'île de la Grande Entrée. À part pour l'île du Havre Aubert, où les pompages ont légèrement diminué pour tous les puits dans les années le plus récentes (de 13 % et moins), aucune tendance ne se dégage par île, car on observe pour chacune à la fois des hausses et des baisses des débits de leurs puits.

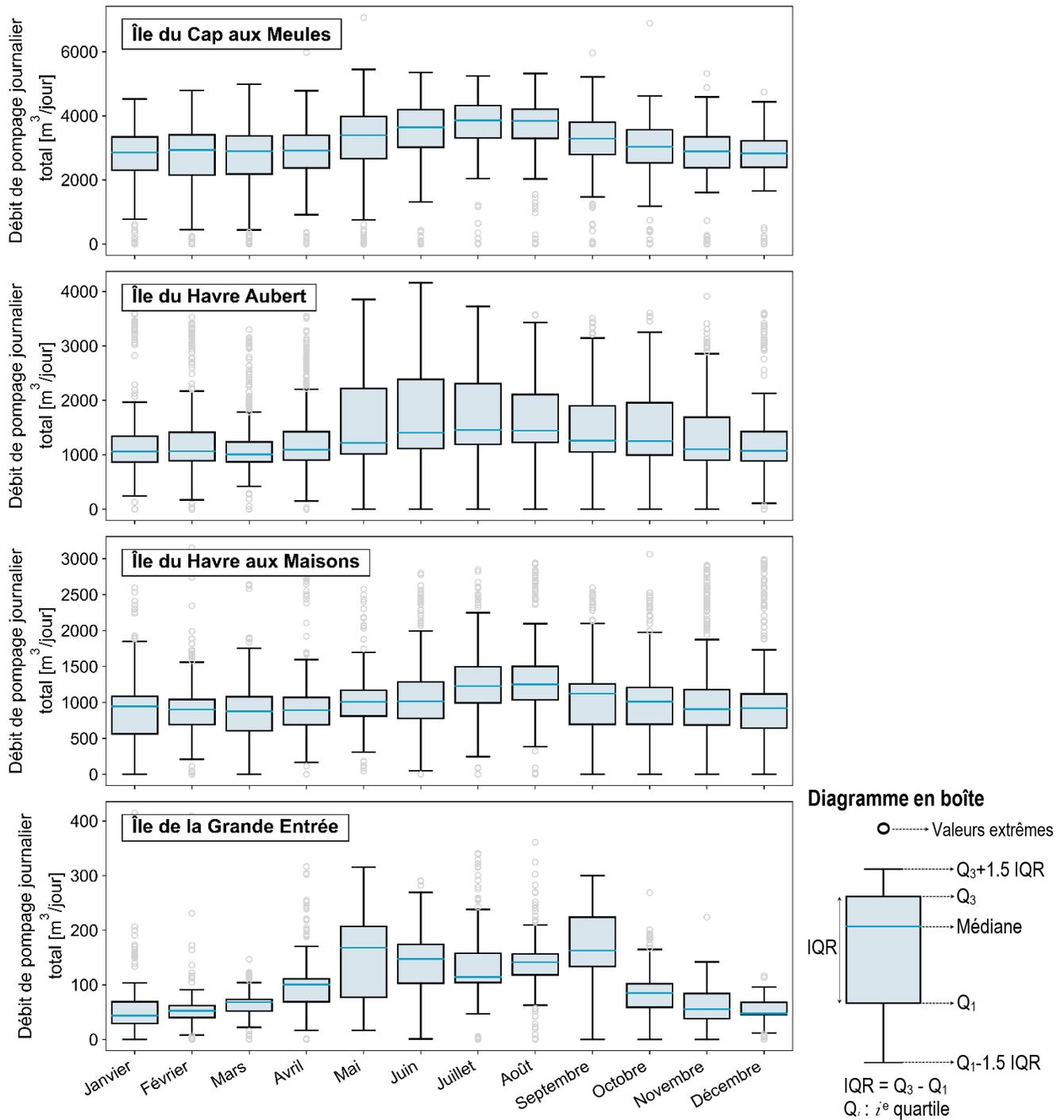
À partir des débits moyens des puits municipaux et des informations des essais de pompage recueillies dans la base de données hydrogéologique, il est possible d'évaluer le rabattement auquel on pourrait s'attendre sous les puits municipaux. De l'ordre de quelques dizaines de centimètres sur l'île de la Grande Entrée, les rabattements attendus peuvent atteindre plusieurs mètres pour certains puits de l'île du Havre Aubert et du Cap aux Meules (maximum de 6,47 m pour le puits P7). Le détail du calcul et les résultats des rabattements sous les puits municipaux sont disponibles à l'Annexe 11.

**Tableau 3.3 : Débits d'exploitation moyens annuels pour les puits municipaux**

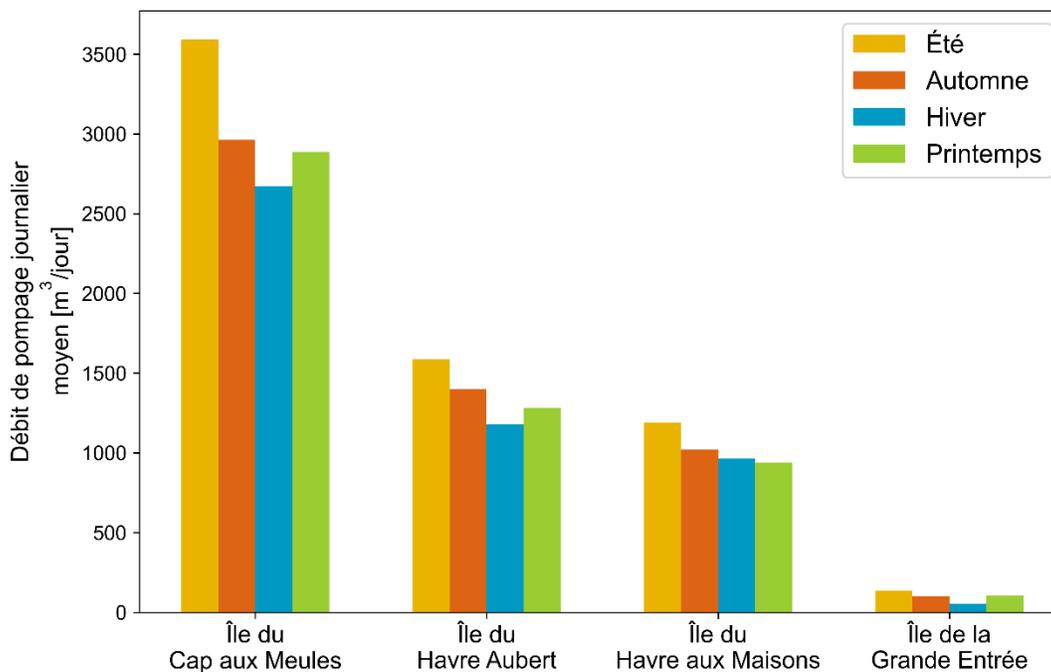
Île	Puits	Débit moyen (m <sup>3</sup> /jour)	
		de 2002 à 2020	de 2014 à 2020
Cap aux Meules	P1	163,7	164,5
	P2	223,4	412,5
	P3	306,4	412,0
	P4	228,7	185,8
	P5	141,5	86,8
	P6	119,9	149,6
	P7	105,1	86,9
	P8	103,0	152,2
	PU1	155,1	139,1
	PU2	240,2	273,1
	PU3	175,0	204,5
	PU4	208,2	214,8
	PU5	88,6	66,2
	PU6	283,0	273,6
	PU7	145,6	177,7
	PU8	215,1	253,4
	PU9	152,8	172,1
PU10	98,2	127,2	
Havre Aubert	P1	324,2	281,2
	P2	412,2	401,2
	P3	224,5	211,2
	P4	210,0	186,0
Havre aux Maisons	P1	202,9	143,2
	P2	174,5	142,1
	P3	202,5	278,6
	P4	137,0	0,0
	HAM-09-01PP	76,5	76,5
	HAM-09-02PP	130,5	130,5
Grande Entrée	FE-06-03		25,4
	FE-06-04		6,9
	FE-06-05		5,6
	FE-06-06		11,3
	GE-09-01A		21,0
	GE-09-02		3,8
	GE-09-03		0,1
	GE-09-04		21,9
	GE-09-05B		6,2

Les débits moyens journaliers de chaque système de distribution ont été calculés, c'est-à-dire en moyennant les débits de tous les puits d'une île pour chaque jour de la période de 2002 à 2020. La Figure 3.2 présente, pour chaque île, des diagrammes en boîte du débit d'exploitation journalier total (somme des débits journaliers moyens de chaque puits) en fonction du mois de l'année, tandis que la Figure 3.3 montre les moyennes journalières en fonction des saisons. On remarque une variabilité assez importante tout au long de l'année. En moyenne pour chaque île, l'exploitation est maximale en été dû à l'augmentation de la demande en eau provenant des industries touristiques et de la pêche. Cette augmentation est suivie d'une diminution progressive jusqu'en hiver. Le pompage se remet graduellement à augmenter au printemps bien que la saison touristique ne soit pas encore débutée, dû à une demande accrue de l'industrie de la pêche. Seule l'île du Havre aux Maisons montre une diminution graduelle qui se poursuit durant le printemps, avant de réaugmenter pour la période estivale.

En moyenne, les puits municipaux de l'île du Cap aux Meules pompent un total de 2 674 m<sup>3</sup>/jour en hiver et 3 592 m<sup>3</sup>/jour en été, ce qui représente une augmentation de 34 %. À l'île du Havre Aubert, cette augmentation est de 35 %, avec 1 178 m<sup>3</sup>/jour prélevé en hiver et 1 585 m<sup>3</sup>/jour prélevés en été. La hausse proportionnelle est plus faible à l'île du Havre aux Maisons, de 26 %, où l'on pompe un débit moyen minimal de 941 m<sup>3</sup>/jour au printemps et un débit moyen maximal de 1 190 m<sup>3</sup>/jour en été. Enfin, à l'île de la Grande Entrée, les débits plus que doublent (hausse de 152 %) en période estivale comparativement à l'hiver, avec des débits moyens respectifs de 54 et 136 m<sup>3</sup>/jour. Les grands écarts proportionnels entre les mois et les saisons de cette île s'expliquent par la part importante de l'eau distribuée consommée par l'usine de transformation des produits de la mer La Renaissance des Îles durant sa période d'opération d'avril à juin et en septembre.



**Figure 3.2 : Débit d'exploitation journalier total pour chaque île en fonction du mois de l'année pour la période de 2002 à 2020 (sauf pour l'île de la Grande Entrée : période de 2014 à 2019)**



**Figure 3.3 : Débit d’exploitation moyen pour chaque île en fonction des saisons (été : juin à août; automne : septembre à novembre; hiver : décembre à février; printemps : avril à mai)**

La Figure 3.4 présente l’évolution annuelle des pompages pour chaque île, à l’aide de diagrammes en boîte. Les pentes des régressions linéaires calculées sur les moyennes des débits de chaque année permettent de constater des tendances variables des pompages pour chaque île. Pour l’île du Cap aux Meules, une hausse annuelle de 38,2 m<sup>3</sup>/jour est observée, ce qui correspond à une hausse totale de 725,8 m<sup>3</sup>/jour entre 2002 et 2020. Pour les îles du Havre Aubert et du Havre aux Maisons, ce sont des diminutions annuelles qui sont constatées, soit de 67,1 et 28,8 m<sup>3</sup>/jour, respectivement. Pour la période de 19 années, ces taux équivalent à des baisses totales respectives de 1 274,9 et 547,2 m<sup>3</sup>/jour. Il est intéressant de remarquer que sur la période de 19 ans, le débit de pompage journalier total à l’île du Havre Aubert aurait diminué de moitié en moyenne. Enfin, une hausse de 12,4 m<sup>3</sup>/jour par année est constatée à l’île de la Grande Entrée, pour un total de 74,4 m<sup>3</sup>/jour durant la période plus récente de 2014 à 2019.

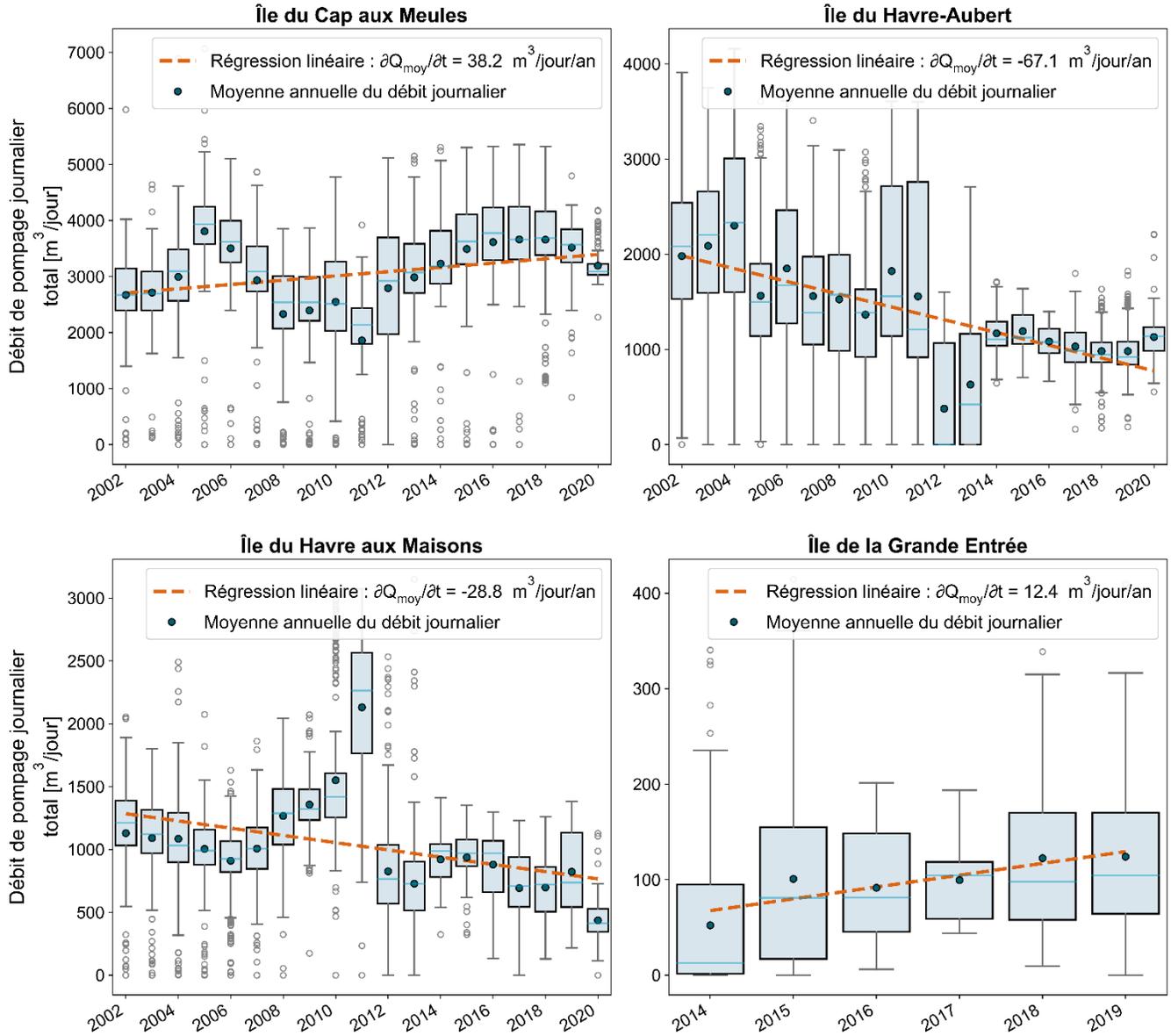


Figure 3.4 : Débit d'exploitation moyen journalier pour chaque île en fonction de l'année

### **3.1.4 Aires de protection**

Le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (chapitre Q 2, r.35.2) définit, pour les prélèvements en eau souterraine, les aires de protection immédiate, intermédiaire bactériologique, intermédiaire virologique et éloignée. Celles-ci ont été déterminées pour les 45 puits de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine par l'Université Laval dans le cadre d'un projet conjoint à cette étude (Tremblay et coll., 2022). Leurs limites sont tracées sur la Carte 14 et à la Figure 3.5. Elles sont localisées sur les îles où des systèmes de distribution d'eau potable sont présents, sur les îles de la Grande Entrée, du Havre aux Maisons, du Cap aux Meules, du Havre Aubert et d'Entrée.

Selon la réglementation, les limites des aires de protection immédiates pour tous les puits correspondent à un rayon fixe de 30 m autour du prélèvement, ce qui représente une superficie de 0,3 ha. Dans le cas spécifique des prélèvements alimentant moins de 500 personnes, la réglementation impose aussi des aires de protection au rayon fixe pour les autres aires de protection. Il s'agit du cas du puits HQ-2 de l'île d'Entrée qui ne dessert que 35 personnes. Pour ses aires de protection intermédiaires bactériologique et virologique, les limites aux rayons respectifs de 100 et 200 m confèrent des superficies respectives de 3,1 et 12,5 ha. Pour l'aire éloignée, le rayon fixe de 2 km doit être orienté vers l'amont hydraulique, formant ainsi un demi-cercle d'une superficie de 625 ha.

Une étude hydrogéologique avec modélisation numérique des écoulements d'eau souterraine a été réalisée en 2021 pour déterminer les aires de protections intermédiaires et éloignées des 44 autres puits qui alimentent 500 personnes ou plus, incluant les sept puits non exploités (Tremblay et coll., 2021). Celle-ci a été mise à jour en 2022 avec les résultats finaux du portrait des ressources en eau souterraine (Tremblay et coll., 2022). Les limites des aires de protection intermédiaires bactériologiques et virologiques correspondent à un temps de parcours de l'eau souterraine dans l'aquifère de 200 et 550 jours, respectivement. L'aire éloignée correspond à l'ensemble de l'aire d'alimentation, soit la superficie du terrain au sein duquel les eaux souterraines y circulant vont éventuellement être captées par le puits. Pour les puits de l'île de la Grande Entrée, les débits de pompage étant beaucoup plus faibles que pour les autres puits, les aires de protection sont beaucoup plus petites. En moyenne les aires de protection intermédiaires bactériologiques, intermédiaires virologiques et éloignées y sont de 0,1, 0,3 et 1,7 ha (Tremblay et coll., 2022). Pour les autres puits des îles du Havre aux Maisons, du Cap aux Meules et du Havre Aubert, les superficies des trois types d'aire de protection varient de 0,2 à 1,4 ha, de 0,6 à 3,0 ha et 8,2 à 41,8 ha, respectivement, avec des moyennes de 0,6, 1,5 et 18,8 ha.

Comme les aires de protection pour un même puits sont imbriquées l'une dans l'autre, la superficie totale du territoire couvert par les aires de protection correspond à celle des aires éloignées, ce qui représente au total 1 296 ha pour les îles de la Madeleine, ou 671 ha en excluant le puits HQ-2 de l'île d'Entrée.

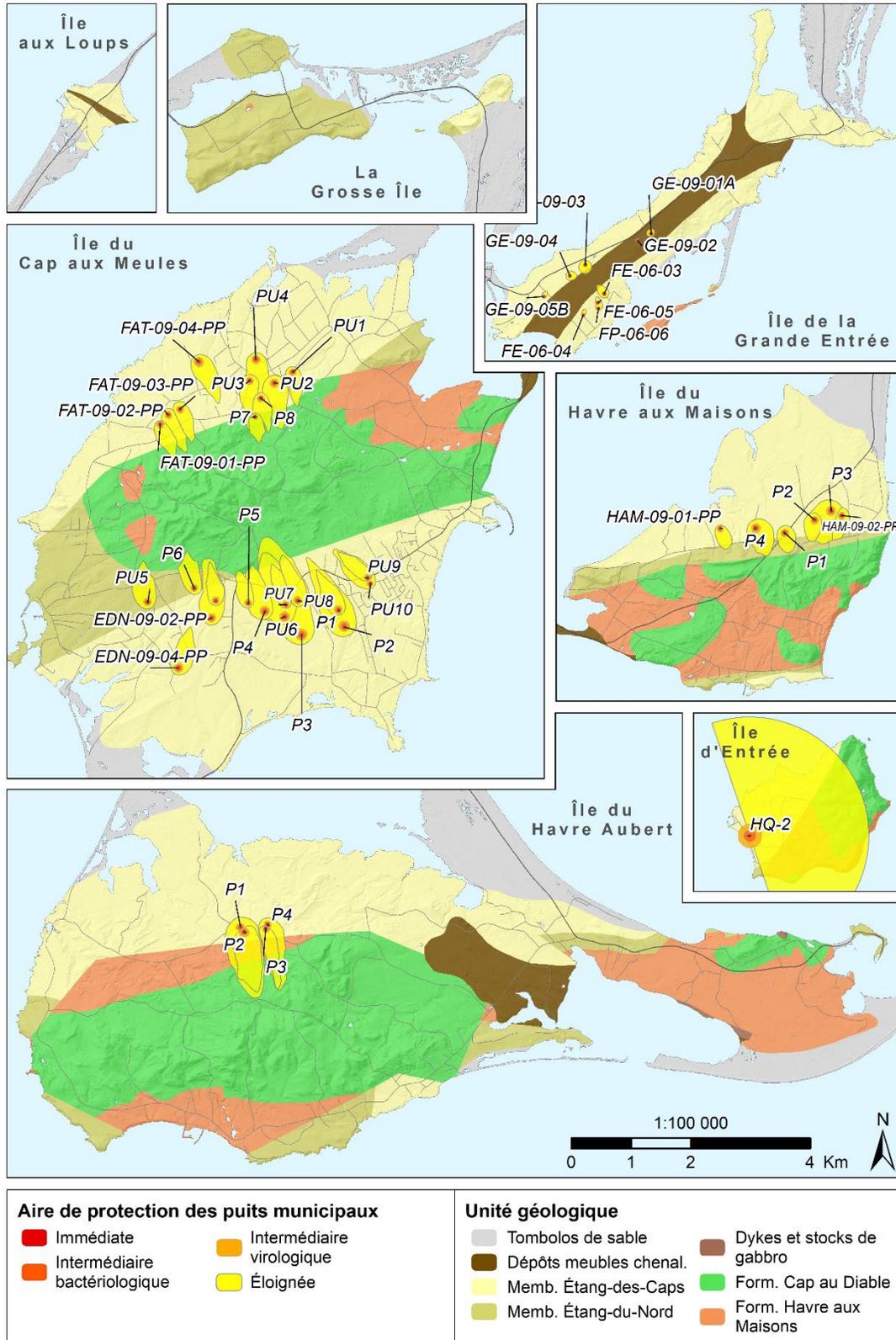


Figure 3.5 : Aires de protection des prélèvements municipaux (la géologie du roc en fond de carte est présentée en détail à la Section 5.1.1)

## 3.2 Usage de la ressource

Tel que présenté précédemment, les volumes d'eau prélevés par les réseaux de distribution d'eau potable sont bien documentés. Par contre, les usages qui sont faits de cette eau le sont beaucoup moins. Cette connaissance est nécessaire afin d'assurer une meilleure gestion de la ressource. De plus, afin de garantir une exploitation durable, notamment pour les puits municipaux, des projections des usages de l'eau doivent être évaluées. Ainsi, dans le cadre de cette étude, la consommation de l'eau, actuelle et projetée en 2050, a été estimée pour les secteurs d'activité résidentiel, agricole, et industriel, commercial et institutionnel (ICI).

### 3.2.1 Estimation de la consommation d'eau actuelle

L'usage de la ressource présentée dans cette section concerne la consommation annuelle de l'eau douce souterraine (exclus l'eau salée et l'eau de surface). Elle inclut à la fois l'eau potable distribuée par la municipalité (Section 3.1), mais aussi l'ensemble des autres prélèvements d'eau, potable ou non, effectués pour les différents secteurs d'activité, soit le résidentiel, l'agricole, ainsi que les industries, commerces et institutions. Pour le secteur résidentiel, ce dernier est divisé en deux parties, soit les résidents permanents et les résidents non permanents (incluant les touristes). Pour chaque secteur d'activité, la source d'approvisionnement de l'eau, soit les réseaux d'aqueduc municipaux ou des puits privés individuels, est déterminée.

L'Annexe 3 présente la méthodologie détaillée pour l'évaluation de l'usage de l'eau aux îles de la Madeleine. Pour le secteur d'activité résidentiel, une estimation du nombre de résidents, permanents et non permanents, a été réalisée pour chaque île et une consommation d'eau de 250 L/personne/jour a été attribuée. Cette valeur correspond à la moyenne de la consommation résidentielle québécoise selon le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC (2015). Pour le secteur d'activité agricole, les superficies des terres agricoles ont été considérées et une consommation en eau leur a été accordée selon le type d'utilisation des terres. De plus, les élevages d'animaux ont été compilés et une consommation d'eau, en fonction de la nature et du nombre d'animaux présents, leur a été attribuée. Finalement, la consommation d'eau du secteur d'activité industriel, commerciale et institutionnel a été estimée à partir des résultats de compteurs d'eau de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine ainsi qu'avec des estimations réalisées dans le cadre de la révision du plan directeur de gestion de l'eau potable de la municipalité (BPR, 2011). Les estimations des trois secteurs d'activité ont été additionnées pour obtenir des valeurs préliminaires de la consommation d'eau annuelle, présentées à l'Annexe 3.

Afin de valider ces valeurs préliminaires, les résultats obtenus pour les réseaux d'aqueduc ont été comparés aux volumes moyens annuels déclarés par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine au MELCC entre 2014 et 2019. Il appert que les résultats préliminaires sous-estiment la consommation réelle, à l'exception des îles d'Entrée et de la Grande Entrée, pour lesquels la consommation est surestimée. Des corrections décrites ci-dessous ont donc été apportées aux estimations de consommation en eau, mais pour les réseaux d'aqueduc seulement. À défaut d'information supplémentaire pour valider les estimations hors réseau, aucune correction ne leur a été appliquée.

Dans un premier temps, le nombre de résidents desservis a été modifié pour les îles d'Entrée et de la Grande Entrée. Le nombre de jours de résidence des résidents non permanents a aussi été diminué pour l'île d'Entrée. Par la suite, comme les valeurs estimées présentaient encore une différence importante avec les déclarations de prélèvement faites au MELCC, il a été supposé que, bien qu'aucune valeur officielle ne soit disponible pour les municipalités des Îles-de-la-Madeleine et de Grosse-Île, la moyenne de la consommation résidentielle québécoise n'était pas représentative de la réalité. Il a été conclu que la consommation moyenne journalière résidentielle par personne serait variable d'une île à l'autre, et nettement plus élevée que 250 L/personne/jour pour certaines îles (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, communication personnelle, 2021). Ainsi, les valeurs de consommation d'eau estimées pour le réseau d'aqueduc ont été ajustées pour toutes les îles disposant d'un réseau d'aqueduc pour correspondre aux déclarations faites au MELCC.

Les estimations finales de la consommation en eau actuelle pour chacune des îles habitées sont présentées en volume annuel (m<sup>3</sup>/an) au Tableau 3.4 et en proportions (%) à la

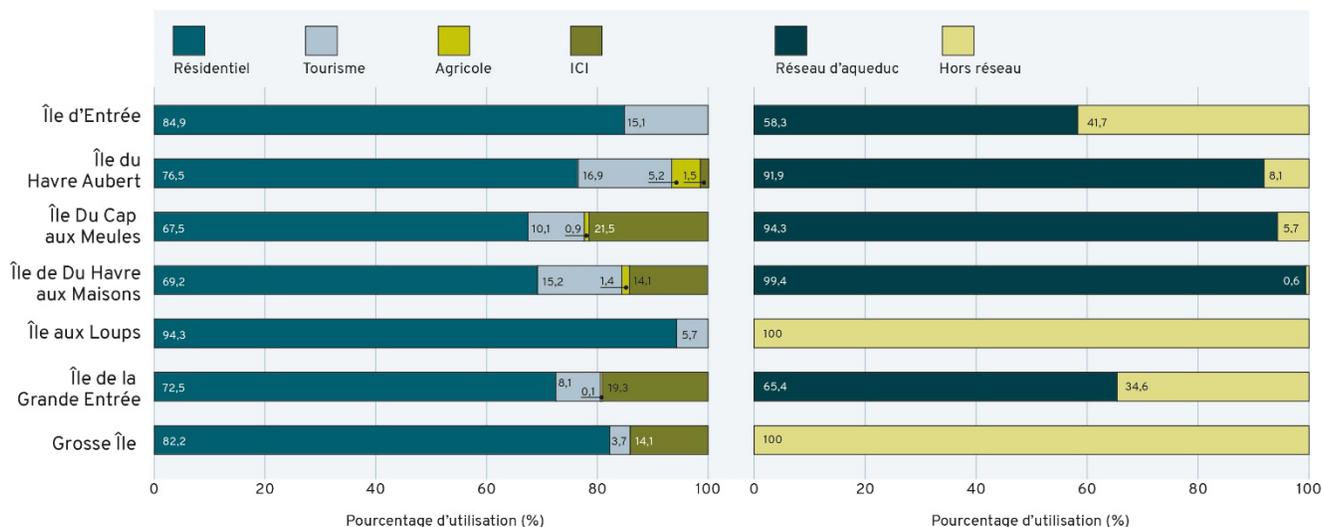


Figure 3.6. Elles sont divisées selon la source d'approvisionnement (réseau et hors réseau) pour les différents secteurs d'activité. Ces estimations sont aussi présentées sur la Carte 15 : Usage de l'eau, en annexe électronique. Il est à noter que les estimations pour la Grosse Île s'appliquent pour la Municipalité de Grosse-Île, qui comprend le secteur de Old Harry, situé lui sur l'île de la Grande Entrée. Inversement, les estimations pour l'île de la Grande Entrée excluent le secteur de Old Harry.

Il est estimé qu'environ 2,2 Mm<sup>3</sup> d'eau douce est consommé annuellement aux îles de la Madeleine, tous usages confondus. Sur l'île du Cap aux Meules, on consomme plus de la moitié de toute l'eau (62 %) du au plus grand nombre d'habitants, mais aussi des ICI présentes sur le territoire. À l'inverse, sur l'île d'Entrée, la moins peuplée et dont les secteurs agricoles et ICI sont négligeables en termes de consommation d'eau, on ne consomme à peine que 0,1 % de l'eau de l'archipel.

L'île du Cap aux Meules montre le volume d'eau le plus important utilisé par les ICI, ce qui s'explique par le nombre plus important d'infrastructures touristiques, de commerces et d'industries sur cette île. De plus, la présence notamment du centre hospitalier, de la Polyvalente des Îles et des activités au port maritime viennent augmenter significativement l'utilisation de l'eau. La quantité d'eau utilisée par le

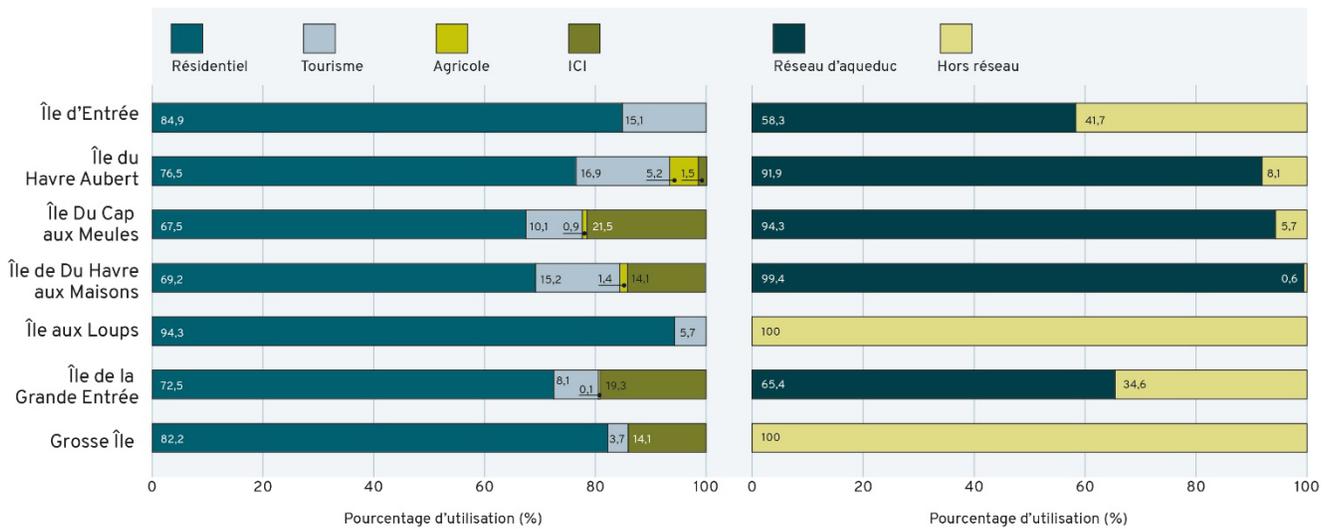
secteur agricole est plus importante sur l'île du Havre Aubert, où l'agriculture est la plus pratiquée, suivi de près par l'île du Cap aux Meules, puis celle du Havre aux Maisons.

La consommation en eau résidentielle, incluant les résidents permanents et non permanents, constitue nettement le secteur consommant le plus d'eau, de 77 à 100 % de la consommation totale des différentes îles. Les résidents non permanents représentent entre 9 et 18 % de la consommation en eau résidentielle pour les îles disposant d'un système d'aqueduc et autour de 5 % pour les autres îles. En effet, les îles ne disposant pas de système d'aqueduc sont aussi les îles plus petites accueillant donc moins de touristes, dû au nombre moins important d'infrastructures disponibles pour les recevoir.

**Tableau 3.4 : Estimations de l'usage de l'eau (en m<sup>3</sup>/an)**

Source d'appr.	Secteur d'activité		Îles de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine							Île de la Municipalité de Grosse-Île	Total Communauté maritime
			Île d'Entrée	Havre Aubert	Cap aux Meules	Havre aux Maisons	Île aux Loups	Grande Entrée	Total	Grosse Île (incluant Old Harry)	
<b>Réseau</b>	Résidentiel	Permanent	409	310 145	880 056	202 237	0	23 755	1 416 602	0	<b>1 416 602</b>
		Non permanent	73	68 403	131 248	44 521	0	2 992	247 237	0	<b>247 237</b>
	Agricole		0	15 419	8 205	4 172	0	48	27 844	0	<b>27 844</b>
	ICI <sup>1</sup>		0	6 347	301 851	41 443	0	7 173	356 814	0	<b>356 814</b>
	Sous-total		482	400 314	1 321 360	292 373	0	33 968	2 048 497	0	<b>2 048 497</b>
<b>Hors réseau</b>	Résidentiel	Permanent	2 281	15 056	45 078	1 186	16 060	6 114	85 775	43 161	<b>128 936</b>
		Non permanent	405	3 321	6 723	261	971	0	11 681	1 943	<b>13 624</b>
	Agricole		0	4 836	3 454	0	0	0	8 290	0	<b>8 290</b>
	ICI <sup>1</sup>		0	0	0	0	0	0	0	7 362	<b>7 362</b>
	Sous-total		2 686	23 213	55 254	1 447	17 031	6 114	105 745	52 466	<b>158 211</b>
<b>Total</b>	Résidentiel	Permanent	2 690	325 201	925 134	203 423	16 060	29 869	1 502 377	43 161	<b>1 545 538</b>
		Non permanent	478	71 724	137 971	44 782	971	2 992	258 918	1 943	<b>260 861</b>
	Agricole		0	20 255	11 659	4 172	0	48	36 134	0	<b>36 134</b>
	ICI <sup>1</sup>		0	6 347	301 851	41 443	0	7 173	356 814	7 362	<b>364 176</b>
	<b>Total</b>		<b>3 168</b>	<b>423 527</b>	<b>1 376 615</b>	<b>293 820</b>	<b>17 031</b>	<b>40 082</b>	<b>2 154 243</b>	<b>52 466</b>	<b>2 206 709</b>

<sup>1</sup> ICI = Industriel, commercial et institutionnel



**Figure 3.6 : Proportion de l'usage de l'eau pour les différentes îles, selon les secteurs d'activité et la source d'approvisionnement**

### 3.2.2 Projections de la consommation d'eau sur les réseaux municipaux en 2050

À partir des estimations de la consommation actuelle en eau, des projections de consommation en eau ont été réalisées pour l'année 2050, soit pour un horizon d'environ 30 ans. L'objectif principal de cette démarche est d'intégrer les besoins futurs de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine dans les évaluations des débits d'exploitation maximaux qu'il est possible de prélever tout en prévenant la contamination des puits par une intrusion d'eau salée, et ce en considérant les changements climatiques (Section 9.1). Les projections ont seulement été établies pour les systèmes de distribution municipaux en eau potable, qui sont présents sur les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, de la Grande Entrée et d'Entrée. Puisque l'île aux Loups et la Grosse Île ne possèdent pas de système d'aqueduc municipal, elles ont été exclues de l'analyse.

Une multitude de scénarios ont été envisagés, à partir des données actuelles, afin d'obtenir une distribution de probabilité de la consommation en eau en 2050. Comme il n'est pas attendu de développement ou déclin significatif des secteurs agricole et ICI causant une variation de consommation d'eau (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, communication personnelle, 2021), les estimations actuelles ont été reprises dans les projections. Ainsi, les scénarios considèrent que seule la consommation du secteur résidentiel fluctuera dans le futur.

Des variations du nombre de résidents permanents, du nombre de résidents non permanents et de la consommation résidentielle journalière (L/personne/jour) ont été considérées. Pour chacun de ces trois paramètres, des valeurs minimale et maximale, présentées au Tableau 3.5, ont été établies en collaboration avec les responsables de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (communication personnelle, 2021). Le détail du choix de ces bornes est présenté à l'Annexe 3. À noter qu'une hausse de la fréquentation touristique est attendue (Tourisme Îles de la Madeleine, 2021), ce qui explique que,

pour les résidents non permanents, la borne maximale correspond à une augmentation plus importante par rapport à la valeur actuelle que la diminution représentée par la borne minimale.

**Tableau 3.5 : Bornes des paramètres résidentiels considérées pour la projection de la consommation en eau des systèmes de distribution d'eau potable en 2050**

	Résidents permanents		Résidents non permanents		Consommation résidentielle individuelle	
	Nombre	Augmentation / diminution par rapport à la valeur actuelle	Nombre	Augmentation / diminution par rapport à la valeur actuelle	Valeur (L/personne/jour)	Augmentation / diminution par rapport à la valeur actuelle
Valeur estimée actuelle	11 354	-	72 251	-	Valeur différente pour chaque île (Annexe 3)	-
Valeur minimale en 2050	9 605	-15 %	65 090	-10 %	Valeur différente pour chaque île (Annexe 3)	-10 %
Valeur maximale en 2050	13 250	+17 %	92 987	+29 %		+10 %

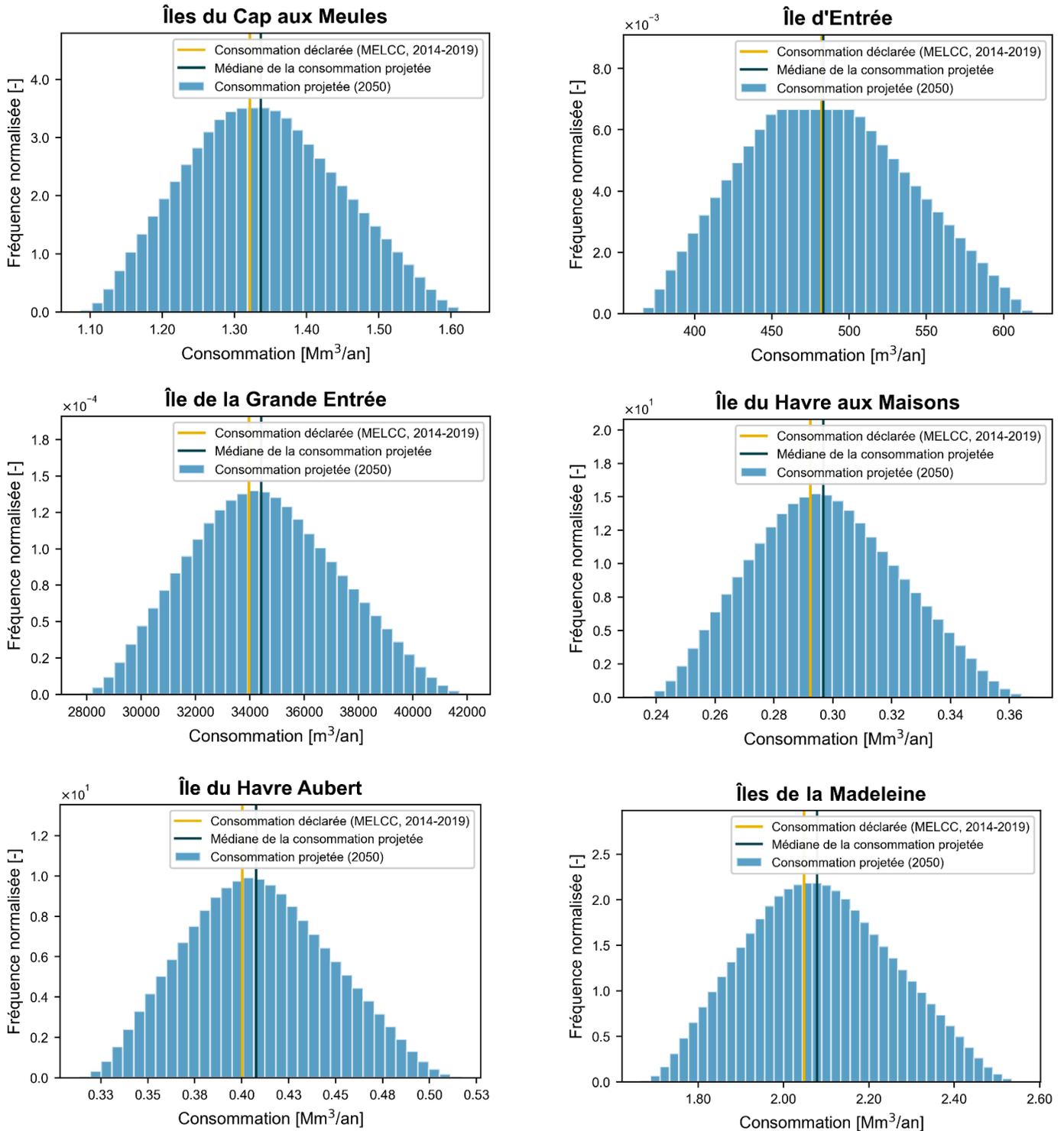
Pour chacun des trois paramètres résidentiels, l'intervalle entre les valeurs minimale et maximale a été subdivisé en 100 valeurs intermédiaires uniformément distribuées. Toutes les combinaisons possibles des 100 valeurs associées à chaque paramètre ont été considérées pour établir 1 000 000 ( $100^3$ ) scénarios de consommation future possibles. Une distribution de probabilité reflétant l'incertitude des connaissances sur l'évolution de la consommation future a pu être construite. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau 3.6 et à la Figure 3.7. La médiane est représentée, accompagnée des estimations de consommation d'eau actuelle.

Au total aux îles de la Madeleine, la médiane de la consommation en eau projetée est plus élevée de 1,5 % par rapport à la consommation d'eau actuelle. Le scénario de projections maximal montre un volume de demande en eau dépassant 2,5 Mm<sup>3</sup>/an, ce qui correspondrait à une augmentation d'environ 0,5 Mm<sup>3</sup>/an, ou 25 %. À l'inverse, le scénario minimal de 1,7 Mm<sup>3</sup>/an, correspondrait à une diminution de 19 %.

Lorsqu'on considère les projections île par île, on constate une augmentation de la consommation en eau pour tous les scénarios médians. Le taux d'augmentation varie entre 1,2 et 1,8 % selon les îles, à l'exception de l'île d'Entrée où il n'est que de 0,2 %. Ceci pourrait s'expliquer par le temps de séjour plus court des résidents non permanents (comprenant les touristes) sur l'île. Pour les projections maximales, on note une augmentation de 24 à 29 %, alors que, pour les projections minimales, les diminutions oscillent entre 17 et 23 %.

**Tableau 3.6 : Estimations de la consommation projetée des systèmes de distribution d'eau potable en 2050 (m<sup>3</sup>/an)**

Système de distribution d'eau potable (île)	Consommation projetée minimale	Consommation projetée maximale	Médiane de la consommation projetée	Consommation actuelle	Différence entre la médiane de la consommation projetée et la consommation actuelle	
Cap aux Meules	1 087 048	1 626 597	1 336 635	1 321 360	15 276	+1,2 %
Havre Aubert	313 527	517 054	407 673	400 314	7 358	+1,8 %
Havre aux Maisons	235 507	367 969	296 781	292 373	4 408	+1,5 %
Grande Entrée	27 788	42 129	34 422	33 968	454	+1,3 %
d'Entrée	367	619	483	482	1	+0,2 %
<b>Total</b>	<b>1 666 183</b>	<b>2 557 769</b>	<b>2 078 595</b>	<b>2 048 497</b>	<b>30 098</b>	<b>+1,5 %</b>



**Figure 3.7: Distribution de probabilité de la consommation (demande) projetée des systèmes de distribution d'eau potable en 2050**

## 4 ACQUISITION DES DONNÉES

Cette étude s'appuie sur des connaissances déjà relativement étoffées. Les îles de la Madeleine présentent un contexte hydrogéologique unique, pour lequel de nombreuses études hydrogéologiques ont été réalisées dans les dernières décennies. Une grande quantité de données caractérisant les eaux souterraines et les aquifères qui les contiennent sont disponibles. Les études existantes ont d'abord été consultées, puis les informations pertinentes extraites afin de constituer une base de données géoréférencées, ci-après nommée base de données hydrogéologiques. Des travaux de terrain sont venus bonifier cette base de données qui constitue l'assise des analyses hydrogéologiques réalisées dans le cadre de ce projet afin d'illustrer le portrait des ressources en eau souterraine de l'archipel. Elle sera aussi un outil très utile pour de nouvelles études portant sur les eaux souterraines ou sur d'autres thématiques touchant le domaine des sciences de la Terre.

La présente section fait d'abord un sommaire des données disponibles provenant d'études antérieures ou de base de données existantes. Un portrait historique des études hydrogéologiques importantes est présenté, accompagné d'un aperçu des suivis piézométriques et d'un résumé sur les nombreux relevés géophysiques. Par la suite, les travaux de terrain réalisés dans le cadre du projet, pour compléter les informations hydrogéologiques disponibles sur le territoire d'étude, sont décrits. Enfin, l'inventaire des informations compilées dans la base de données hydrogéologiques est dressé.

### 4.1 Information existante

Lors de la phase I (Lemieux et coll., 2019) et de la phase II (Germain et coll., 2021) de l'étude, beaucoup d'effort a été consacré à l'acquisition et la compilation de données disponibles sur les eaux souterraines dans la base de données hydrogéologiques. Une recherche exhaustive d'informations existantes portant sur la géologie et l'hydrogéologie des îles de la Madeleine a été effectuée auprès du plus grand nombre d'intervenants publics ou privés susceptibles de posséder de telles informations. La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et la Municipalité de Grosse-Île ont été des collaborateurs de premier plan à cet effet.

Les informations proviennent de divers supports, tels que des rapports d'étude, des bases de données municipales ou gouvernementales, des documents cartographiques, des couches d'information géographique ou des communications personnelles. Les informations pertinentes ont été extraites de ces documents et compilées dans la base de données hydrogéologiques. Le Tableau 4.1 présente le nombre d'objets renseignés dans la base de données hydrogéologiques (ex. : puits, affleurement, trou non aménagé, piézomètre) selon les types de support de l'information. La majorité des objets (51 %) provient de rapports techniques de consultants, produits au cours des dernières décennies. Le système d'information géominière SIGÉOM a permis d'ajouter un nombre considérable d'affleurements (21 %) et de nombreux puits et piézomètres (19 %) ont été compilés du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MELCC. Les autres objets proviennent de données détenues par l'Université Laval (3 %), de la base de données de forage du MTQ (2,5 %), de données de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (2 %) et du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCC (1,5 %).

**Tableau 4.1 : Synthèse des données (objets) recueillies par type de support**

<b>Support</b>	<b>Nombre d'objets</b>
Rapports d'étude	938
Système d'information géominière (SIGÉOM)	383
Système d'information hydrogéologique (SIH) du MELCC	351
Données de l'Université Laval	62
Base de données de forage du MTQ	46
Données de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	36
Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) du MELCC	26
<b>Total</b>	<b>1 842</b>

Le nombre important de rapports d'étude reflète l'ampleur des analyses hydrogéologiques réalisées dans le passé. Voici les types de rapports consultés :

- Étude hydrogéologique;
- Approvisionnement en eau potable;
- Étude géotechnique;
- Caractérisation environnementale;
- Étude géophysique;
- Capacité de production d'un aquifère;
- Demande d'autorisation de prélèvement d'eau.

Le Tableau 4.2 présente le nombre de rapports d'étude obtenus par organisme et pour lesquels des informations ont été extraites et compilées dans la base de données hydrogéologiques. La majorité des rapports provient de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (33 %) et de différents ministères du gouvernement du Québec (33 %). Diverses universités ont fourni un nombre important de rapports (14 %) ainsi qu'Hydro-Québec (9 %), le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) (4 %) et Transport Canada (4 %). Les trois rapports restants proviennent d'Environnement Canada, d'Ouranos et de l'Office de planification et de développement du Québec.

**Tableau 4.2 : Synthèse des rapports d'étude consultés par organisme**

Organisme	Nombre de rapports
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	55
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)	22
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN)	19
Hydro-Québec	14
Université Laval	10
Ministère des Transports du Québec (MTQ)	8
Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE)	7
Transport Canada	7
Université du Québec à Rimouski (UQAR)	6
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)	4
École polytechnique de Montréal	4
Institut national de recherche scientifique (INRS)	2
Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH)	1
Environnement Canada	1
Office de planification et de développement du Québec	1
Ouranos	1
Université de Waterloo	1
Université d'Avignon	1
<b>Total</b>	<b>164</b>

#### 4.1.1 Études hydrogéologiques antérieures

Compte tenu du grand nombre d'études hydrogéologiques réalisées préalablement au *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, il apparaît d'intérêt de présenter un historique de celles ayant contribué significativement à l'apport de connaissances sur les eaux souterraines de l'archipel.

La première étude hydrogéologique d'envergure réalisée aux îles de la Madeleine est celle de Dessureault et Simard (1970). Cette étude a été réalisée pour faire l'inventaire des eaux souterraines, par la réalisation de forage, l'installation de puits d'observation et d'exploitation et la réalisation d'un levé sismique au cours des étés 1966 et 1967. L'étude a permis d'identifier et délimiter l'étendue des formations aquifères aux îles de la Madeleine, ainsi que d'évaluer la qualité de l'eau qu'on y retrouve. Cette dernière a été qualifiée d'acceptable à des fins de consommation domestique ou industrielle. Cette étude est également la première à révéler le contexte hydrogéologique particulier des îles, caractérisé par une lentille d'eau douce souterraine qui flotte sur des eaux souterraines salées plus denses, ainsi que les risques d'intrusion d'eau salée dans les puits de captage.

Par la suite, un modèle numérique en éléments finis a été développé par Sylvestre (1974), afin d'évaluer l'intrusion d'eau salée pouvant se manifester sous un puits en pompage dans le contexte des îles de la Madeleine. Il a été utilisé afin de recommander des avenues pour une exploitation sécuritaire de l'eau douce par les puits municipaux de l'île du Cap aux Meules.

Durant la même décennie, des travaux de géophysique ont été réalisés par Geoterrex (1971; 1976) afin de mieux définir l'étendue de la lentille d'eau douce souterraine et l'emplacement de l'interface eau douce – eau salée pour l'ensemble des îles de l'archipel à l'exception de l'île d'Entrée. Le détail de ces travaux est présenté dans l'historique des travaux de géophysique à la Section 4.1.3.

Peu de temps après, une étude hydrogéologique a été réalisée par le MERN pour la Grosse Île et l'île de la Grande Entrée afin d'évaluer la disponibilité en eau souterraine sur ces îles (Poulin, 1977). Ainsi, de nombreux forages sont réalisés à l'automne 1977, en plus d'essais de pompage et d'échantillonnage d'eau souterraine pour en évaluer la qualité. Il a été recommandé de conserver l'exploitation de l'aquifère par des puits domestiques dispersés, afin d'éviter une intrusion d'eau salée par le pompage avec des débits trop importants. Malgré tout, des emplacements ont été recommandés dans le cas éventuel où une exploitation d'envergure serait nécessaire.

Vers la même époque, Sylvestre (1979a) a utilisé un modèle numérique pour évaluer la disponibilité en eau douce souterraine pour la Grosse Île et l'île de la Grande Entrée, en lien avec le projet d'exploitation d'une mine de sel par la société SOQUEM et de l'aménagement d'un port de mer.

Sylvestre a ensuite réalisé une étude hydrogéologique de grande envergure pour le MERN (Sylvestre, 1979b) afin d'évaluer les disponibilités de la ressource d'eau douce des îles de la Madeleine et donner des recommandations sur les méthodes d'exploitation. Les recherches et travaux réalisés ont permis la production d'une carte hydrogéologique comprenant une estimation de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée. Cette carte constitue une véritable synthèse des connaissances sur les eaux souterraines disponibles à l'époque et présente des données de qualité de l'eau, des propriétés hydrauliques, des chroniques piézométriques et des coupes hydrogéologiques.

De manière plus localisée, de nombreuses études se sont concentrées sur le site de la centrale thermique de l'île du Cap aux Meules à partir de 1989, à la suite d'un déversement d'hydrocarbures évalué à 40 000 L (voir Section 6.2.1.2). Parmi celles-ci, des essais de caractérisation des grès rouges ont été réalisés par l'Université Laval (Gélinas et Choquette, 1996) et permettent une meilleure connaissance des propriétés hydrauliques du roc. Des travaux de décontamination ont été entamés et un système mis en place jusqu'en 2001 pour confiner l'étendue du déversement. Par la suite, un programme de suivi a été déployé, le détail étant présenté à la Section 4.1.2. L'INRS-ETE a participé à de nombreuses études sur ce terrain (Lachance et coll., 1993; Martel et coll., 2015; Martel et coll., 2017). Ces travaux ont permis d'acquérir une meilleure connaissance du contexte hydrogéologique dans ce secteur de l'île du Cap aux Meules.

Parallèlement, de nombreuses études ont été réalisées pour le forage de puits municipaux et la réalisation d'essais hydrauliques dans ces derniers pour établir la capacité du puits et un débit de pompage sécuritaire sur les îles du Cap aux Meules (Compagnie Internationale des Eaux Ltée, 1974 et 1975; Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc., 1993), du Havre Aubert (Compagnie Internationale des Eaux Ltée, 1969; Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc., 1995 et 1998) et du Havre aux Maisons (Consultants H.G.E. Inc., 1987; Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée, 1993).

Leblanc (1994) a évalué le débit d'exploitation sécuritaire pour huit puits de pompage situé sur l'île du Cap aux Meules. Pour ce faire, il a comparé trois méthodes, soit en réutilisant les essais de pompage de

Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1993), en utilisant une méthode analytique dérivée de la relation de Ghyben-Herzberg et des hypothèses de Dupuit, et en développant une méthode numérique.

À partir de 2002, un groupe d'experts en hydrogéologie, le Groupe Madelin'Eau, a été mandaté afin d'accroître les connaissances du contexte hydrogéologique et fournir des outils pour améliorer la gestion de l'eau souterraine aux îles de la Madeleine. Dans un premier temps, un sommaire des connaissances disponibles a été réalisé (Groupe Madelin'Eau, 2003). Par la suite, des modélisations de l'écoulement souterrain et des potentiels d'intrusion saline ont été produites (Groupe Madelin'Eau, 2004). Au cours des années suivantes, le Groupe Madelin'Eau a réalisé différents travaux (évaluation du potentiel géothermique (2005), demandes d'autorisation pour des prélèvements additionnels et de nouveaux captages municipaux (2007; 2009; 2010a; 2010b; 2010c), choix de sites pour la réalisation d'un forage d'exploration gazière (2011),) et continué ses investigations, entre autres par la mise en place d'un suivi piézométrique de la nappe phréatique, à proximité des puits de pompage municipaux (2012). Son dernier mandat s'est terminé en 2012.

Plus récemment, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) a mis en place un comité d'étude pour évaluer les « Effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière » (BAPE, 2013). Certaines recommandations du rapport d'enquête sont discutées à la Section 6.2.5.3. Un document de référence qui contient une synthèse des connaissances en lien avec les eaux souterraines aux îles de la Madeleine a été produit dans ce cadre par l'UQAR (Chaillou et coll., 2012.).

Des travaux de terrain et de modélisation numérique ont été réalisés par l'Université Laval (Hassaoui et coll., 2014) dans le but d'évaluer l'impact des changements climatiques et du pompage sur les ressources en eau disponibles aux îles de la Madeleine. L'étude suggère la mise en place d'un suivi du niveau de la nappe phréatique, de la salinité de l'eau et de la position de l'interface eau douce – eau salée dans les puits.

Durant la même période, des puits traversant l'interface eau douce – eau salée ont été forés, sur les îles de la Grande Entrée et du Cap aux Meules, par le MELCC en collaboration avec l'Université Laval, afin d'établir un réseau de suivi des eaux souterraines aux îles de la Madeleine. Des sondes de conductivité électrique sont mises en place dans ces puits et sont à ce jour, toujours suivies. Le détail de leur installation est présenté dans le rapport de Lemieux et coll. (2017).

Très récemment, la firme Arrakis (2019) a été mandatée par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine pour évaluer, à l'aide d'essais hydrauliques, la performance de puits de pompage des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons ayant présenté une perte d'efficacité. Des travaux de réhabilitation ont depuis été réalisés (Arrakis, 2021).

Entre-temps, un rapport d'analyse de la vulnérabilité des sources d'eau potable aux îles de la Madeleine, tel qu'exigé par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2), a été complété par l'équipe de l'Université Laval (Tremblay et coll., 2022). Des travaux de modélisation numérique ayant permis de délimiter les aires de protection des puits municipaux ont été effectués (Section 3.1.4). Les menaces à la quantité et la qualité de l'eau exploitée que posent les activités humaines pratiquées à l'intérieur de ces aires de protection ont été évaluées. Ce rapport a aussi dressé un portrait détaillé des installations de captage municipal, dont un survol est présenté à la Section 3.1.1.

### 4.1.2 Suivis piézométriques

Au fil du temps, plusieurs suivis temporels des variations de l'élévation de la nappe phréatique ont été initiés. Les paragraphes qui suivent présentent un survol de ces suivis.

Les niveaux d'eau dans les puits d'alimentation municipaux sont enregistrés en continu par les systèmes de télémétrie (Section 3.1.2). Les puits d'observation à proximité de ces puits ont aussi bénéficié de suivis. Lors de leurs travaux de caractérisation hydrogéologique en 2009, le Groupe Madelin'Eau (2012) a installé 31 sondes de niveau d'eau, de type Solinst LTC ou LT. Quelques sondes ont aussi été déployées dans des puits municipaux qui n'étaient pas encore en pompage. La récolte et compilation des données de ces sondes a été faite par le Groupe Madelin'Eau de 2011 à 2013. Lors des travaux de terrain du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, la tournée de ces puits a été faite afin de récolter les données. Seulement 15 des 31 ont été retrouvées et étaient encore fonctionnelles. Les données étaient disponibles de juin 2013 à décembre 2017 pour les sondes LT et de juin 2013 à mai 2015 pour les sondes LTC, après quoi la mémoire était saturée et les nouvelles données n'étaient plus récoltées. Ces sondes ont donc été réinitialisées, pour permettre la prise de données de la fin de l'été 2019 à l'automne 2021. Un tableau sommaire sur les sondes installées, leur état à ce jour et les dates de données disponibles est accessible en Annexe 4.

Sur l'île du Cap aux Meules, suite aux travaux de décontamination en lien avec le déversement d'hydrocarbures à la centrale thermique (Section 6.2.1.2), un programme de suivi environnemental a été mis en place par Hydro-Québec et le MELCC de 2001 à 2006, afin de suivre la qualité de l'eau, la piézométrie et l'épaisseur de phases flottantes des contaminants organiques (Martel et coll., 2015). Une synthèse des travaux de suivi a été réalisée en 2006 et le programme s'est ensuite prolongé. Une nouvelle synthèse des travaux a été réalisée en 2012 et en 2013, où l'INRS-ETE a évalué le programme de suivi. Puis, à l'automne 2015, l'INRS-ETE a poursuivi ce programme de suivi lors d'une étude hydrogéologique dans le secteur du parc industriel de l'Étang-du-Nord (Martel et coll., 2015). Pour ce faire, l'INRS-ETE a foré et installé de nouveaux puits d'observation à proximité et sur le terrain de la centrale thermique. Dans quatre de ces puits, des sondes de niveau d'eau ont alors été installées (HQ15-P4, HQ15-P8, HQ15-P21 et P-Orange (13007084)). En novembre 2016, deux nouvelles sondes ont été mises en place dans les puits HQ16-P19 et HQ15-P13. Lors des campagnes de terrain entre 2019 et 2021 dans le cadre de la présente étude, les données de ces sondes ont été récoltées, à l'exception des puits HQ15-P8 et HQ15-P21, dans lesquels aucune sonde n'a été retrouvée. De plus, une sonde a été trouvée au puits HQ15-P20 et ses données ont aussi été récoltées. Les données disponibles pour ces sondes sont présentées à l'Annexe 4. À la demande de l'INRS-ETE, l'ensemble de ses sondes a été retiré des puits à l'automne 2021.

Plusieurs puits d'observation ont été mis en place par le MELCC dans le cadre du déploiement du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). Aux îles de la Madeleine, six puits d'observation, forés à l'automne 2016, fournissent des données de charge hydraulique en continu depuis 2017, soit cinq sur l'île de la Grande Entrée (F-1, F-2, F-3, F-4 et GE-01) et un sur l'île du Cap aux Meules (EDN-01). Ils ont été forés à de grandes profondeurs pour intersecter l'interface eau douce – eau salée dans l'objectif d'en faire le suivi. Des profils de conductivité électrique ont aussi été réalisés dans ces puits chaque année par le MELCC. Cinq (5) sondes de type Solinst LTC, mesurant la conductivité électrique, le niveau d'eau et la température, sont installées dans les puits à l'île de la Grande Entrée, à

différentes profondeurs, afin d'observer les changements dans l'interface eau douce – eau salée sur le long terme. Une seule sonde est installée dans le puits de l'île du Cap aux Meules (EDN-01). Deux autres puits du RSESQ pour le suivi sont aussi présents sur l'île du Cap aux Meules et ont été forés en 2012 (Fatima-1 et Fatima-2). Ces puits n'intersectent toutefois pas l'interface eau douce – eau salée. Une sonde de niveau d'eau enregistre des données depuis 2018 et 2019 pour le puits Fatima-1 et Fatima-2, respectivement. D'autres suivis ont aussi été réalisés par le MELCC dans le passé dans 15 autres puits. Ils ne sont toutefois plus suivis à ce jour. Parmi ceux-ci, des données sont disponibles pour huit puits d'observation, entre 1968 et 1995. Les tableaux sommaires sur les stations actives et inactives du RSESQ sont fournis en Annexe 4.

Finalement, dans le cadre de ce projet, quatre sondes de niveau d'eau, de type Solinst LT, ont été installés dans quatre puits privés en 2019. Ces puits, situés sur les îles du Cap aux Meules (IDM001260), du Havre aux Maisons (IDM000088 et IDM000103) et de Grosse Île (IDM000665), n'étaient pas en pompage et distancés des puits de pompage municipaux, permettant un suivi de l'état naturel de la nappe phréatique. Le détail de leur installation est présenté à la Section 4.2.6. Ces sondes ont été retirées des puits lors de la dernière campagne de terrain à l'automne 2021.

### **4.1.3 Relevés géophysiques**

De nombreux relevés géophysiques ont été réalisés aux îles de la Madeleine au fil des années. Les méthodes qui ont été utilisées sont les sondages de résistivité électrique, les tomographies de résistivité électrique ainsi que les relevés électromagnétiques transitoires. Leur utilisation visait à connaître la profondeur de l'interface eau douce – eau salée. Des diagraphies ont aussi été réalisées dans certains puits afin de mesurer les propriétés pétrographiques des aquifères. La localisation de ces relevés est présentée à la Figure 4.1.

Les premiers relevés géophysiques réalisés aux îles de la Madeleine ont été faits par Geoterrex (1971), qui avait été mandatée par le ministère des Richesses naturelles du Québec. Des sondages de résistivité électrique ont été réalisés à 126 stations pour un total de 27 profils afin de localiser l'interface eau douce – eau salée sur le bord de la mer, au centre des îles et à proximité des puits municipaux, et aussi pour connaître l'élévation de la nappe phréatique. Les relevés ont été réalisés sur l'ensemble des îles habitées, à l'exception de l'île d'Entrée. Une seconde étude a été réalisée par Geoterrex (1976), afin de compléter les travaux entrepris en 1971. Cette nouvelle campagne avait pour but d'évaluer l'effet des pompes municipales sur la nappe phréatique. Une fois encore, des sondages de résistivité électrique ont été réalisés, cette fois à un total de 51 stations réparties sur l'île du Havre Aubert, du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons.

En 1990, Hydro-Québec a mandaté Géophysique GPR International inc. (1990a; 1990b) afin de réaliser des levés géophysiques sur le terrain de ses deux centrales thermiques, à Cap-aux-Meules ainsi qu'à l'île d'Entrée. Des levés électromagnétiques à très basse fréquence et du géoradar ont été réalisés afin de mieux comprendre la présence de fractures subverticales dans le roc à Cap-aux-Meules et caractériser le contexte géologique et hydrogéologique à l'île d'Entrée. La localisation de ces levés n'est pas présentée sur les cartes, car les rapports qui les décrivent ne présentent que le quadrillage général de la zone d'étude, sans les points précis de mesure.

En 1995, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a commandité une étude à proximité du puits Vigneau, situé sur l'île du Havre Aubert (Bureau, 1995). Cette étude avait pour but de localiser l'interface eau douce – eau salée en utilisant des méthodes géophysiques, soit des sondages de résistivité électrique.

Le Groupe Madelin'Eau a réalisé en 2003 et en 2004 des levés géophysiques afin de mieux comprendre le contexte hydrogéologique aux îles de la Madeleine, principalement près des puits de pompage municipaux. La tomographie de résistivité électrique (TRE) a été utilisée afin de connaître la profondeur de l'interface eau douce – eau salée. En 2003, 26 relevés ont été effectués sur l'ensemble des îles habitées (Groupe Madelin'Eau, 2003). Par la suite, une campagne en 2004 a permis de réaliser 10 relevés supplémentaires sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2004). En parallèle, une thèse de doctorat a été réalisée par Comte (2008) pour interpréter les données récoltées et les appliquer à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers.

Une équipe de l'École Polytechnique de Montréal a effectué des travaux de recherche en géophysique aux îles de la Madeleine entre 2009 et 2014 (Chouteau et Intissar, 2010; Chouteau et coll., 2011; Chouteau et Abderrezak, 2014). En 2009, des mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE) ont été réalisées le long de deux profils à Fatima et l'Étang-du-Nord, sur l'île du Cap aux Meules, aux mêmes emplacements que le Groupe Madelin'Eau en 2003. En 2010, 24 sondages ont été réalisés, soit 16 sur le profil TRE de l'Étang-du-Nord et 8 sur le profil TRE de Fatima, en utilisant la méthode électromagnétique transitoire (TDEM – *Time Domain Electromagnetic Method*) afin d'augmenter la profondeur d'investigation et déterminer la profondeur de l'interface eau douce – eau salée. En 2011, 49 nouveaux sondages TDEM ont été réalisés sur les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, la Grosse Île et de la Grande Entrée. Finalement, en 2012 et 2013, 30 sondages TDEM ont été réalisés sur l'île d'Entrée, du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée. Lors de ces campagnes de terrain, des diagraphies ont aussi été réalisées, sur les différentes îles, dans des puits municipaux et des puits du RSESQ appartenant au MELCC.

Finalement, dans le cadre de la présente étude, des travaux ont été réalisés conjointement entre l'INRS-ETE et l'Université Laval en 2019. Au total, 693 mesures de la méthode électromagnétique transitoire (TDEM) ont été réalisées. Le détail de ces travaux est présenté à la Section 4.2.3. L'objectif de ces travaux était de documenter l'hétérogénéité des grès du Membre de l'Étang-des-Caps, qui constitue le milieu aquifère principal de l'archipel (Section 5.1.1), et localiser l'interface entre l'eau douce et l'eau salée en profondeur sur les différentes îles habitées, excluant l'île d'Entrée. Des diagraphies ont aussi été réalisées dans des puits municipaux, des puits privés et des puits du RSESQ. Les détails sont présentés dans le rapport de la phase II (Germain et coll., 2021). Les travaux de l'INRS-ETE, se concentrant sur l'île de la Grande Entrée, sont présentés dans un rapport final remis au MELCC (Yrro et coll., 2020).

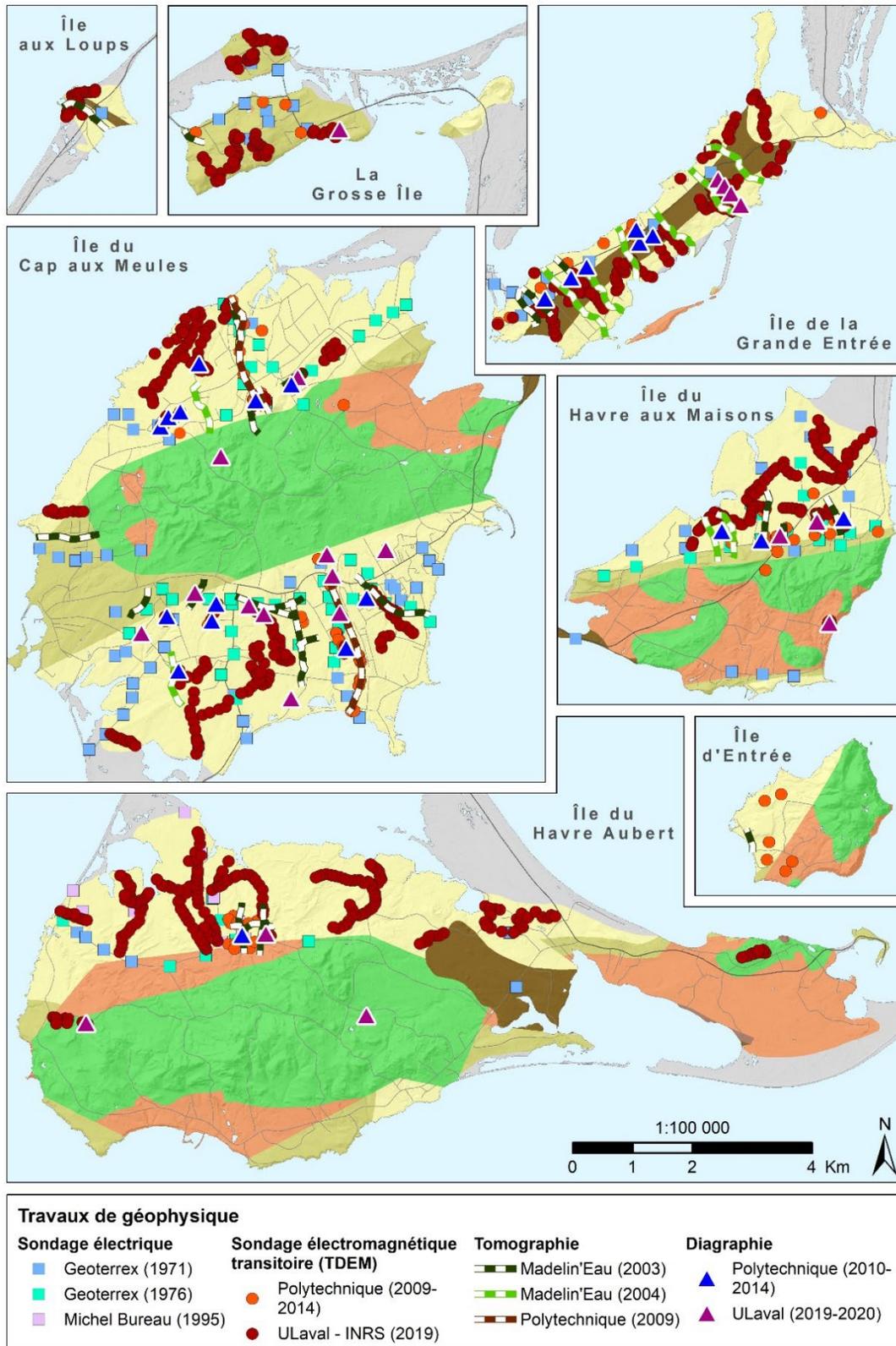


Figure 4.1 : Localisation des travaux de géophysiques historiques (la géologie en fond de carte est présentée en détail à la Section 5.1.1 – pour la légende, voir la Figure 5.8)

## 4.2 Travaux de terrain

Pour compléter le portrait des ressources en eau souterraine, des informations complémentaires étaient nécessaires. C'était notamment le cas pour la qualité de l'eau, dont de nombreux résultats d'échantillonnage étaient disponibles parmi les informations, mais qui sont difficilement comparables, car les protocoles d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire ont évolué au fil du temps et diffèrent d'une source de données à l'autre. Une meilleure caractérisation des aquifères, par exemple par l'étude de leur hétérogénéité horizontale autant que verticale, était un ajout important pour mieux définir les modèles conceptuels à intégrer aux travaux ultérieurs de modélisation numérique des écoulements. Des données de suivi piézométrique à des endroits additionnels à ceux des informations existantes étaient utiles pour le calage des modèles afin d'établir une surface piézométrique et une position de l'interface eau douce – eau salée plus précise.

Les travaux de terrain ont été réalisés lors de deux campagnes de terrain, à l'été 2019 et l'automne 2020. Cette section présente une synthèse des travaux de caractérisation réalisés suivant :

- Échantillonnage de l'eau souterraine;
- Essais hydrauliques :
  - Essais de perméabilité multi-niveaux;
  - Essais de perméabilité à charge variable;
- Levés géophysiques;
- Diagraphies;
- Profils de conductivité électrique;
- Suivi piézométrique.

Leur localisation est présentée à la Figure 4.2. Le rapport de la phase II (Germain et coll., 2021) présente un portrait plus détaillé des travaux de terrain réalisés dans le cadre du projet. Les résultats de ces travaux ont été compilés dans la base de données hydrogéologiques.

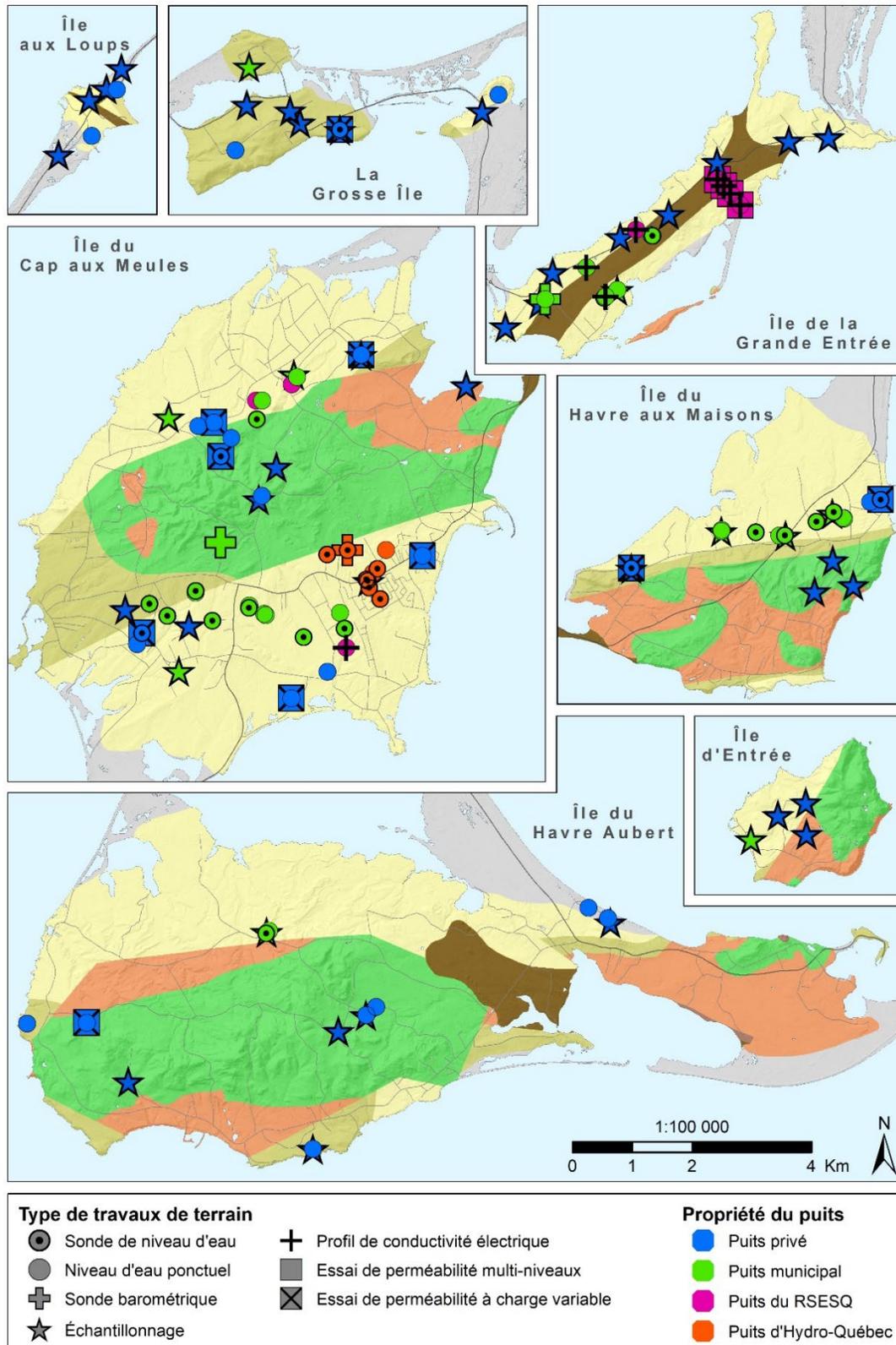


Figure 4.2 : Localisation des travaux de terrain (la géologie en fond de carte est présentée en détail à la Section 5.1.1 – pour la légende, voir la Figure 5.8)

#### **4.2.1 Échantillonnage d'eau souterraine**

Des travaux d'échantillonnage d'eau souterraine ont été réalisés lors des deux campagnes de terrain dans 48 puits ouverts au roc et répartis sur toutes les îles principales habitées (Figure 4.2). Ainsi, 10 échantillons ont été prélevés à l'été 2019 et 38 échantillons et cinq duplicatas ont été prélevés à l'automne 2020. La qualité de l'eau a été évaluée selon les critères de potabilité édictés par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) (chapitre Q-2, r.40) et les objectifs esthétiques établis par Santé Canada (2019a). Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons d'eau sont présentés et discutés à la Section 8.5.

#### **4.2.2 Essais hydrauliques**

Deux types d'essais hydrauliques ont été réalisés, soit des essais de perméabilité multi-niveaux et des essais de perméabilité à charge variable. Ces essais avaient pour but de mesurer les propriétés hydrauliques des différentes unités géologiques de l'archipel. La localisation de ces essais est présentée à la Figure 4.2.

##### **4.2.2.1 Essais de perméabilité multi-niveaux**

Les essais de perméabilité multi-niveaux ont été réalisés dans deux puits du RSESQ, soit les puits F-1 et F-2 sur l'île de la Grande Entrée, lors des deux campagnes de terrain de 2019 et 2020. Ces essais concernaient la partie ouverte au roc de chaque puits. Ces travaux ont aussi été réalisés dans le cadre du projet *Surveillance de l'intrusion d'eau salée et quantification des résurgences d'eau souterraine en milieu marin aux Îles-de-la-Madeleine en contexte de changements climatiques* (Germain et coll., 2022), un projet réalisé simultanément aux îles de la Madeleine par l'équipe de l'Université Laval. Le détail du traitement des données y est présenté.

Lors de la campagne de 2019, 30 et 19 essais ont été réalisés dans les puits F-1 et F-2 respectivement, sur des intervalles de 2,34 m de longueur. Deux obturateurs pneumatiques ont été utilisés afin d'isoler les intervalles d'essais et deux capteurs de pression ont enregistré les variations du niveau d'eau, soit un dans l'intervalle isolé et un au-dessus. À chaque intervalle de profondeur, une colonne d'eau était introduite de façon instantanée dans l'intervalle isolé, provoquant la variation instantanée du niveau d'eau puis un retour progressif à son état initial, correspondant à des essais de perméabilité en descente. Pour le traitement des données, le modèle KGS (Hyder et coll., 1994) a été utilisé pour les essais sur-amortis et le modèle Springer et Gelhar (1991) pour les essais amortis critiques et sous-amortis. Les résultats obtenus sont présentés dans le rapport de la phase II (Germain et coll., 2021).

Les mêmes puits ont été investigués à nouveau en 2020, mais cette fois en utilisant trois obturateurs pneumatiques, permettant ainsi de mesurer la conductivité hydraulique verticale et pouvoir évaluer l'anisotropie le long des deux puits. Ainsi, 35 et 22 essais ont été réalisés dans les puits F-1 et F-2 respectivement, le long d'intervalles de 1,3 m. Une méthode numérique avec le logiciel Ir2dinv (Bohling et Butler, 2001) a été utilisée pour le traitement des données. Le détail du traitement est présenté dans le rapport (Germain et coll., 2022). Les résultats sont décrits à la Section 8.1.1.

##### **4.2.2.2 Essais de perméabilité à charge variable**

Des essais de perméabilité à charge variable (*slug tests*) ont été réalisés dans 10 puits résidentiels répartis sur les différentes îles et dans les différentes unités géologiques (Figure 4.2). Ces essais

consistent à faire varier de manière instantanée le niveau d'eau dans un puits, à l'aide d'une tige pleine, et en observant son retour au niveau initial avec une sonde de niveau d'eau mise en place tout au long de l'essai. Au minimum trois essais ont été réalisés par puits afin d'assurer la reproductibilité des résultats (Bulter, 1998). Pour le traitement des données, le modèle KGS (Hyder et coll. 1994) a été utilisé pour les essais sur-amortis alors que les essais amortis critiques et sous-amortis ont été interprétés avec le modèle de Springer et Gelhar (1991). Les résultats obtenus de ces essais ont été compilés dans la base de données hydrogéologiques et ont contribué à estimer les propriétés hydrauliques des aquifères (Section 8.1.1).

#### **4.2.3 Levés géophysiques**

Des levés TDEM ont été réalisés durant l'été 2019, afin de documenter l'hétérogénéité du membre de l'Étang-des-Caps et localiser l'interface eau douce – eau salée. La méthode consiste à induire un champ électromagnétique dans le sol pour mesurer le taux de décroissance du champ électromagnétique induit, qui dépend de la conductivité électrique des matériaux géologiques. Ces travaux ont été réalisés avec la collaboration de l'INRS-ETE (collaborateurs cités à la Section 1.4). Au total, 693 mesures statiques et une ligne de mesure mobile ont été réalisées, localisées à la Figure 4.1, principalement dans l'unité géologique du Membre de l'Étang-des-Caps. Pour traiter les données recueillies, un processus itératif d'inversion géophysique a été utilisé afin d'obtenir une interprétation qui permet de mieux comprendre la géologie sous-jacente. La gestion des données, le prétraitement et l'exécution du code d'inversion sont gérés par la plateforme de programmation Python. Le détail de la méthodologie employée est présenté dans le rapport de la phase II (Germain et coll., 2021).

#### **4.2.4 Diagraphies**

Des travaux de diagraphie ont été réalisés lors des deux campagnes de terrain (2019 et 2020) et lors d'une précédente campagne de terrain de l'Université Laval en 2017, dans 27 puits différents, soit 13 sur l'île du Cap aux Meules, cinq sur l'île du Havre aux Maisons, trois sur l'île du Havre Aubert, un sur l'île d'Entrée et cinq sur l'île de la Grande Entrée. L'objectif était d'obtenir des informations sur les unités géologiques, de reconstituer le schéma d'aménagement de certains puits et de contraindre l'inversion des levés TDEM. Pour ce faire, cinq sondes différentes ont été utilisées, soit un diamètreur, une sonde à rayonnement gamma, une sonde à induction, une sonde *Fluid-Temperature-Conductivity* (FTC) et une caméra optique. Les puits investigués, localisés à la Figure 4.1, sont des puits municipaux et d'Hydro-Québec, ainsi que des puits résidentiels.

Cinq sondes ont été utilisées, soit le diamètreur, la sonde à rayonnement gamma, la sonde à induction, la sonde Fluid-Temperature-Conductivity (FTC) et la caméra optique. Les données récoltées ont été mises en forme avec le logiciel de visualisation spécialisé WellCAD. Les résultats sont présentés à l'Annexe 5. Les résultats pour l'île de la Grande Entrée comprennent aussi des résultats de diagraphie obtenus lors d'une campagne de terrain de l'Université Laval en 2017.

#### **4.2.5 Profils de conductivité électrique**

Des profils de conductivité électrique ont été réalisés dans six puits du RSESQ et deux puits municipaux profonds (Figure 4.2). Ceux-ci ont permis d'identifier la profondeur de la transition entre l'eau douce et

l'eau salée et visualiser son étendue. La sonde manuelle Solinst, modèle 107 TLC Meter a été utilisée. Le profil de température de l'eau a aussi été obtenu. Les résultats des profils des puits du RSESQ sont présentés et discutés à la Section 5.2.1. À noter que le MELCC réalise de tels profils deux fois par an dans chacun de leur puits du RSESQ traversant l'interface eau douce – eau salée, et ce, depuis 2016. Les résultats de ces profils ont été partagés et inclus dans nos analyses.

#### **4.2.6 Piézométrie**

Un suivi du niveau piézométrique a été entrepris en prévision des travaux de calage des modèles numériques afin de couvrir l'ensemble du territoire d'étude. Le suivi a aussi permis d'évaluer les variations saisonnières de la nappe phréatique.

Dans un premier temps, des mesures ponctuelles ont été relevées dans 73 puits différents, privés ou municipaux. Par la suite, des sondes de niveau d'eau ont été installées en 2019 dans quatre puits privés, suffisamment distancés des puits de pompage municipaux pour ne pas être influencés. De plus, 16 sondes de niveau d'eau et deux sondes barométriques présentes dans des puits d'observation à proximité des puits d'alimentation municipaux, ainsi que six sondes de niveau d'eau et une sonde barométrique présentes dans des puits d'observation d'Hydro-Québec, ont été utilisées (voir Section 4.1.2). En effet, ces sondes avaient été installées lors d'études passées et laissées en place. Ainsi, les données enregistrées depuis ont été récoltées et les sondes ont été réinitialisées afin de récolter de nouvelles données.

Afin d'obtenir une élévation précise de l'eau par rapport au niveau moyen de la mer, des travaux d'arpentage ont été effectués pour 21 puits résidentiels et trois puits d'observation municipaux dont l'altitude était inconnue ou incertaine.

La répartition des sondes et des mesures de niveau d'eau ponctuel est présentée à la Figure 4.2. Les résultats des suivis piézométriques sont détaillés à la Section 8.3.1.4.

### **4.3 Inventaire des données**

#### **4.3.1 Base de données hydrogéologiques**

##### **4.3.1.1 Objets**

Les informations existantes, issues des rapports d'étude antérieurs ou de base de données municipales et gouvernementales, ainsi que les données obtenues des travaux de terrain, ont été compilées dans la base de données hydrogéologiques. Celle-ci comprend 1 842 objets géoréférencés distingués selon leur type (Tableau 4.3). Les puits sont le type d'objet le plus fréquent (56 %), suivi des affleurements rocheux (21 %), des trous non aménagés (17 %) et des piézomètres (5 %). Les autres types d'objets, soit les sources ou résurgences d'eau souterraine, les réservoirs d'eau potable et le site d'échantillonnage d'eau de surface, constituent à eux tous moins de 1 % de l'ensemble des objets de la base de données hydrogéologiques. La localisation de chaque objet est présentée à la Figure 4.3.

Un numéro d'archivage a été attribué à chaque objet de la base de données hydrogéologiques (ex. : IDM#####). Chaque objet est localisé dans l'espace à l'aide de ses coordonnées géographiques. Les

informations de localisation comprennent aussi l'altitude de la margelle du puits ou du sol. L'organisme à la source de l'information et la référence au rapport d'étude sont également fournis. Le propriétaire de l'objet (ex. : puits) et son adresse sont inscrits. Des informations sur le puits de captage sont rapportées, entre autres sur son utilisation (approvisionnement en eau pour une résidence, un commerce, une institution ou une industrie, ou bien pour l'agriculture ou la pisciculture), le type d'aquifère (granulaire ou roc fracturé) et le niveau de confinement de la nappe (captive, semi-captive ou libre). Les infrastructures des captages sont caractérisées par des informations comme la méthode de forage, la profondeur atteinte, le diamètre du forage et la date de construction. Lorsque disponibles, des données sur les venues d'eau, la crépine, le tubage et la margelle sont compilés.

**Tableau 4.3 : Types et nombres d'objets de la base de données hydrogéologiques**

Type d'objet	Nombre d'objets
Puits	1 027
Affleurement rocheux	383
Trou non aménagé	315
Piézomètre	101
Source ou résurgence d'eau souterraine	10
Réservoir d'eau potable	5
Site d'échantillonnage d'eau de surface	1
<b>Total</b>	<b>1 842</b>

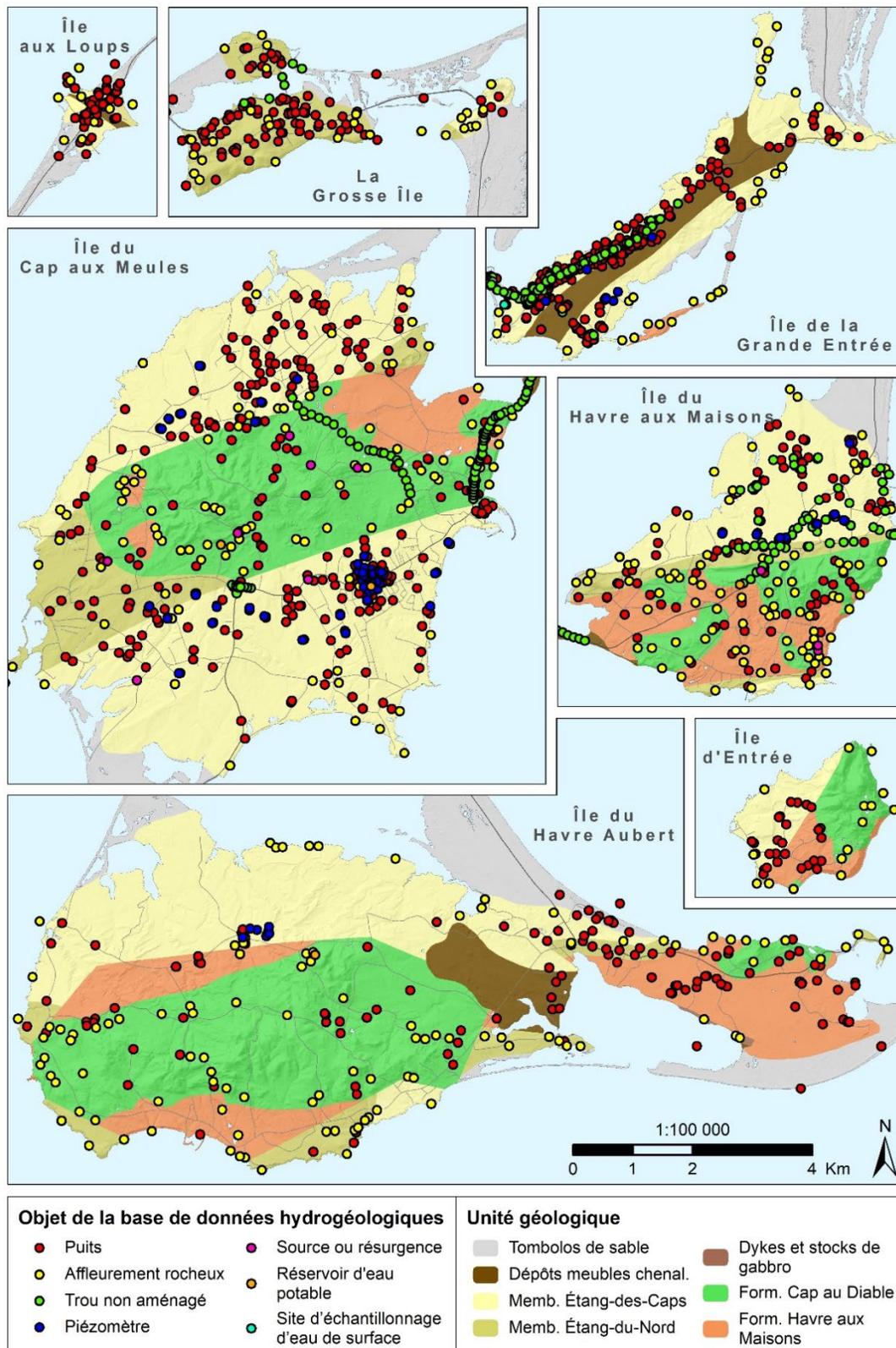


Figure 4.3 : Localisation des objets de la base de données hydrogéologiques (la géologie du roc en fond de carte est présentée en détail à la Section 5.1.1)

#### 4.3.1.2 Observations

Plusieurs types d'observation sont rapportés dans la base de données hydrogéologiques (Tableau 4.4). Dans certains cas, plusieurs observations de même type s'appliquent à un seul objet, tandis qu'à l'inverse, de nombreux objets ne sont pas concernés par certains types d'observation.

**Tableau 4.4 : Nombre d'observations de la base de données hydrogéologiques associées à chaque type d'observation**

Type d'observation	Nombre d'observations
Description stratigraphique	1 217
Niveau d'eau	1 162 669
Essai hydraulique	991
Analyse géochimique	131 864
Analyse granulométrique de sédiments	377

La description stratigraphique des forages comprend, pour chaque séquence stratigraphique, l'épaisseur, la profondeur et la description du matériel rencontré. La description du matériel est aussi codifiée afin d'automatiser et de faciliter les analyses subséquentes.

Les niveaux d'eau proviennent de 729 objets (puits ou piézomètres) différents. À chaque niveau d'eau est associé une date et une heure de mesure, de même que des informations portant sur la position du niveau par rapport au sol, sur l'influence du pompage d'un puits sur le niveau, et sur la représentativité d'un niveau statique ou dynamique. La profondeur de l'eau dans le puits est rapportée, ainsi que l'identification du repère utilisé.

Pour les essais hydrauliques, les informations compilées concernent la date et l'heure, le type d'essai effectué, la méthode d'interprétation, la durée, le débit pompé, les niveaux d'eau statique et dynamique, la référence au puits d'observation et la distance de ce dernier par rapport au puits pompé. Les paramètres hydrogéologiques rapportés sont le coefficient d'emmagasinement et d'emmagasinement spécifique, la capacité spécifique, la transmissivité et la conductivité hydraulique.

La vaste majorité des analyses géochimiques correspond à des profils réalisés dans les puits du RSESQ, soit 98 % des entrées (129 241). Des 2 623 résultats restants, la plupart proviennent des cinq réservoirs du système d'aqueduc municipal (73 %). Presque tous les autres résultats (26,6 %) proviennent d'échantillons d'eau prélevés dans des puits privés ou de puits d'observation. Des résultats d'eau de surface (0,3 %) sont disponibles pour le lac à Rob de l'île de la Grande Entrée.

Les analyses granulométriques sont issues de 195 forages différents. Chaque analyse comprend les données de profondeur de l'échantillon récolté, la taille des particules de sédiments selon le pourcentage passant ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  et  $d_{90}$ ).

#### 4.3.1.3 Fiabilité et validation

Une analyse portant sur la fiabilité et la validation des données a été effectuée, en respectant la méthode décrite dans un protocole élaboré pour les PACES (Lambert et coll., 2010).

Dans un premier temps, chaque objet de la base de données hydrogéologiques s'est vu attribuer des cotes de fiabilité qui considèrent l'incertitude liée à la méthode utilisée pour récolter l'information. Elles

servent d'aide à la décision dans le cas où des informations seraient en contradiction. Deux grandes catégories sont présentes, soit les cotes de fiabilité de la localisation, qui comprend cinq critères différents, et les cotes de fiabilité de la source, qui en comprend deux. Pour chaque cote, une valeur variant entre 1 et, tout au plus, 6 est attribuée. Une valeur faible présente un degré d'incertitude faible alors qu'une valeur plus élevée présente un degré d'incertitude élevé. Le détail de ces cotes de fiabilité et le nombre d'objets leur étant associé sont présentés à l'Annexe 6.

Plusieurs critères de validation ont été élaborés afin de porter un jugement sur l'exactitude des données, indépendamment de son degré de fiabilité. Ces critères de validation permettent de sélectionner ou rejeter les données à utiliser lors de la réalisation des analyses hydrogéologiques. Ils se concentrent sur trois aspects. Dans un premier temps, la localisation permet de valider la position de l'objet. Ensuite, la validation technique s'assure que les observations associées à l'objet ne se contredisent pas et sont généralement comparables avec l'information des autres objets à proximité. Et finalement, la validation scientifique s'applique suite à un certain traitement de la donnée impliquant un calcul scientifique. Les critères de validation concernent parfois l'objet, parfois les observations associées à l'objet. Les critères de validation et le nombre d'objets ou d'observations leur étant associé sont présentés à l'Annexe 6.

#### **4.3.2 Base de données bibliographiques**

Les 164 rapports d'étude obtenus des différents organismes (Tableau 4.2) ont été numérisés en format de document portable (PDF), et un numéro d'archivage séquentiel leur a été attribué. Pour chaque objet compilé de la base de données hydrogéologiques, le numéro du ou des rapports desquelles provient l'information a été rapporté dans un champ spécifique. Une base de données bibliographiques a ensuite été développée, comprenant notamment les renseignements suivants :

- Titre de l'étude;
- Auteur(s);
- Date de publication;
- Propriétaire du rapport (source);
- Accessibilité (publique/confidentiel);
- Institution ou consultant ayant réalisé le rapport;
- Municipalité ou îles concernées par l'étude;
- Type d'étude;
- Contenu pertinent (ex. : aires d'alimentation d'ouvrage de captage, analyse chimique d'eau, description stratigraphique, essais hydrauliques, interface eau douce – eau salée, journal de forage, modèle d'écoulement, vulnérabilité d'aquifère).

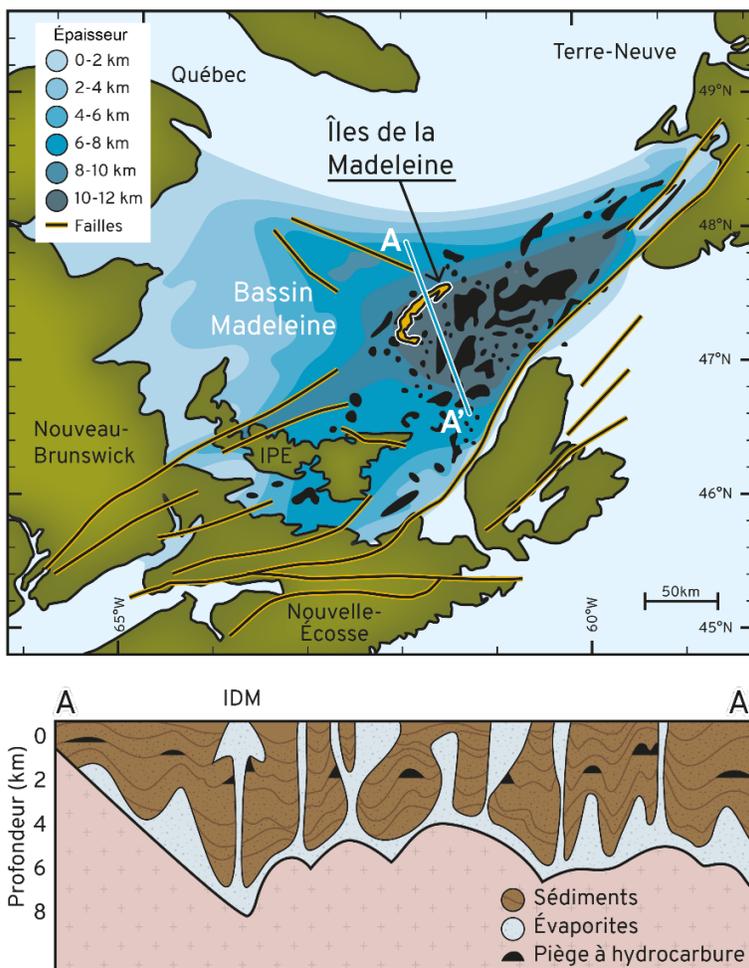
Le contenu de la base de données bibliographiques est présenté à l'Annexe 4. On y retrouve le numéro des rapports et les références complètes.

## 5 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

### 5.1 Contexte géologique

#### 5.1.1 Géologie du socle rocheux

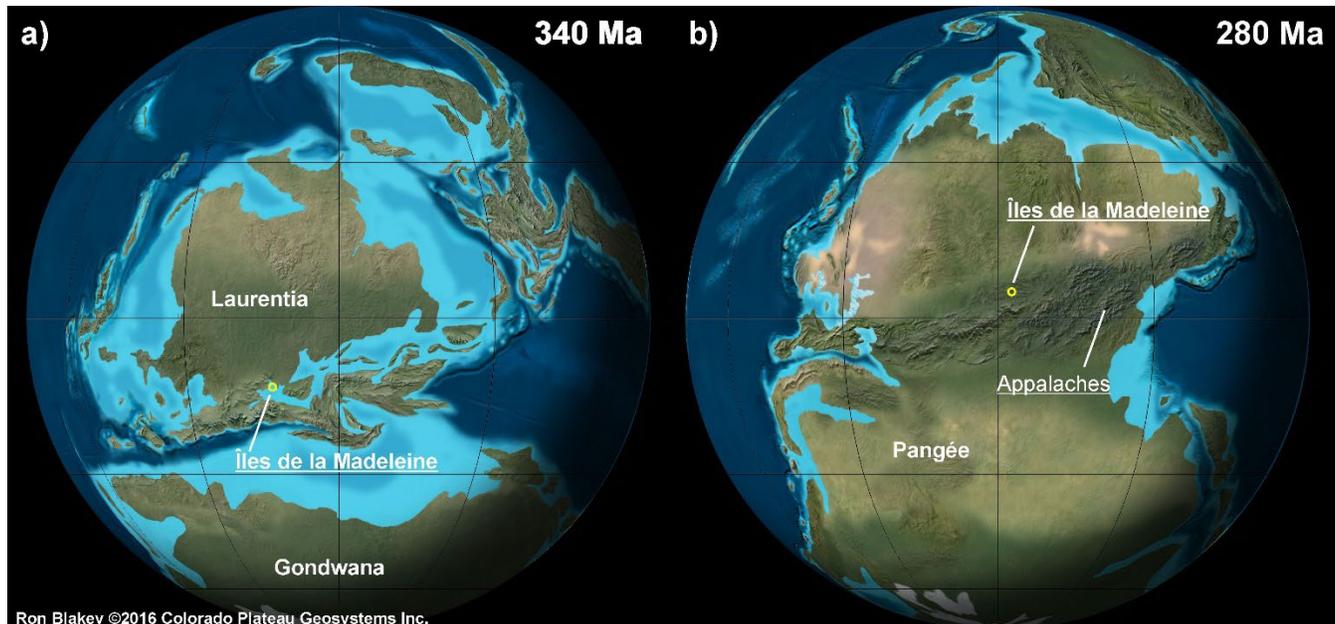
Les îles de la Madeleine font partie du bassin carbonifère des Maritimes. Il s'agit d'une vaste cuvette sédimentaire localisée sur la partie sud du golfe du Saint-Laurent, incluant une partie des provinces maritimes (Brisebois, 1981). Le bassin est subdivisé en sous-bassins, dont celui de Madeleine, qui en occupe la partie centrale (Figure 5.1). L'archipel des îles de la Madeleine se situe environ au centre de ce sous-bassin qui touche également au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard. Il couvre une superficie d'environ 165 000 km<sup>2</sup>, dont 65 000 km<sup>2</sup> sont émergés. Le socle rocheux des îles est principalement constitué de roches sédimentaires (grès, conglomérats, calcaire) accumulées au Carbonifère et au Permien (-360 à -245 Ma), accompagnées de roches volcaniques qui témoignent de l'histoire géologique de la région.



**Figure 5.1 : Localisation du Bassin Madeleine indiquant l'épaisseur des roches sédimentaires et la position des diapirs. La coupe A-A' illustre de manière schématique les diapirs et les roches sédimentaires déformées par leur remontée, incluant les pièges à hydrocarbures. Modifié de Lavoie et coll. (2009).**

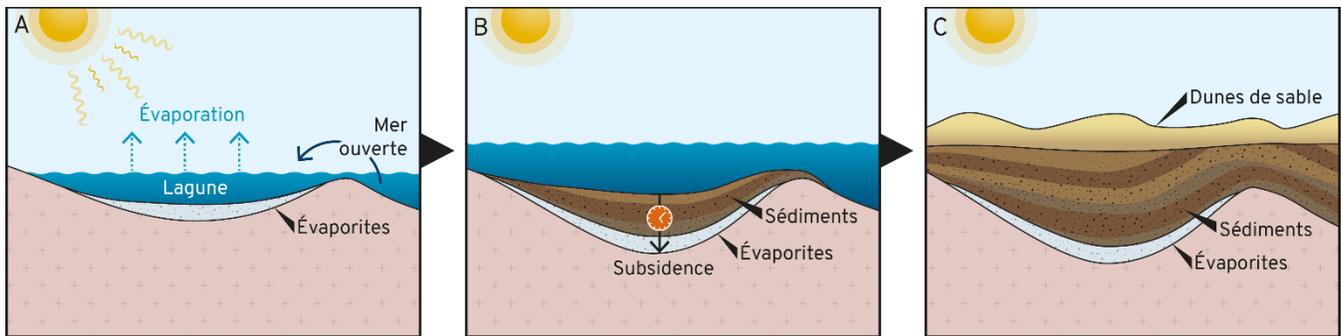
### 5.1.1.1 Géologie régionale

Pour comprendre l'histoire géologique des îles de la Madeleine, il faut remonter il y a environ 360 millions d'années, soit au début de la période géologique du Carbonifère. À cette période, en raison des forces associées à la tectonique des plaques, l'ensemble des continents de la planète a commencé à se rassembler afin de former un supercontinent appelé Pangée, dont la formation a culminé à la fin du carbonifère, vers 300 Ma. Durant cette période, la collision des anciens continents a contribué à la formation de grandes chaînes de montagnes comme les Appalaches, qui ont achevé de s'ériger lors de la collision des paléocontinents Laurentia et Gondwana. La Figure 5.2 illustre la position des continents durant cette période.



**Figure 5.2 : Localisation des îles de la Madeleine au Carbonifère et au Permien. a) Au Carbonifère, il y a 340 Ma, les îles étaient localisées dans une lagune légèrement au sud de l'équateur. b) Au Permien, il y a 280 Ma, les îles étaient situées dans un environnement désertique continental, légèrement au nord de l'équateur. Figure préparée par Ron Blakey ©2016 Colorado Plateau Geosystems Inc. et utilisée sous permission. Reproduction interdite**

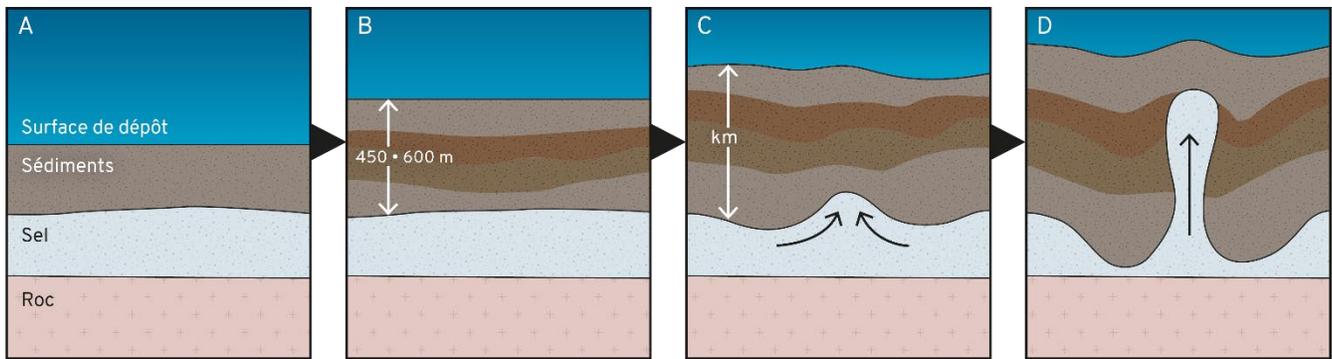
Durant la période du carbonifère, le mouvement des plaques tectoniques a causé l'apparition d'une vaste diversité de paysages qui étaient caractérisés par la présence de grandes forêts primitives. Parmi ces paysages, un long bras de mer sillonnait l'intérieur de la Pangée, d'où les îles de la Madeleine tirent leur origine. À cette époque, ce bras de mer peu profond était situé près de l'équateur sous un climat tropical (Figure 5.2a). Il formait une lagune où l'évaporation intense a causé la précipitation de minéraux dissous dans l'eau de mer afin de former des roches appelées des évaporites (gypse, anhydrite, halite et sylvite; Figure 5.3a). Ces dernières se déposaient sur le fond de la lagune, et en raison d'un apport constant d'eau de mer et de la subsidence de la lagune, d'importantes épaisseurs d'évaporites se sont accumulées pendant des millions d'années. De plus, au début du Carbonifère, la température globale de la Terre était nettement supérieure à la température actuelle en raison d'une concentration élevée en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce qui favorisait l'évaporation.



**Figure 5.3 : Schéma chronologique expliquant le contexte géologique des îles de la Madeleine. a) Au Carbonifère inférieur (360-323 Ma), une lagune tropicale était à l'origine de la déposition d'évaporites (gypse, anhydrite, halite et sylvite). b) Au Carbonifère supérieur (323-298 Ma), la subsidence du bassin et la remontée relative du niveau marin ont permis l'accumulation d'une importante épaisseur de sédiments marins. c) Au Permien (298-252 Ma), le bassin sédimentaire a été exhumé. Une fraction des sédiments a été érodée, mais de nouveaux sédiments se sont éventuellement déposés en milieu continental dans un environnement désertique**

La subsidence de la lagune a donné lieu au développement d'un grand bassin – le Bassin Madeleine – en forme de cuvette où les couches d'évaporites ont progressivement été recouvertes d'une importante quantité de sédiments marins (Figure 5.3b). Il s'agit de boues fossilifères ou de sédiments terrigènes provenant de l'érosion des chaînes de montagnes adjacentes comme les Appalaches. Ceux-ci se sont transformés progressivement en roche sous l'effet de la pression des sédiments sus-jacents et sont devenus du calcaire, du siltstone, du conglomérat et du grès. Des épisodes volcaniques ont ponctué cette longue période de déposition, et sont à l'origine de coulées de lave présentes dans la séquence sédimentaire. Le bassin a éventuellement émergé au Permien, entre 298 et 252 Ma. Lors de son émergence, une fraction des sédiments a été érodée, mais de nouveaux sédiments se sont éventuellement déposés en milieu continental dans un environnement désertique (Figure 5.2b et Figure 5.3c).

Lors de l'accumulation progressive des sédiments au Carbonifère, ceux-ci exerçaient un poids important sur les couches d'évaporites sous-jacentes. De plus, lorsque les sédiments se sont progressivement transformés en roche, ils sont devenus plus compacts et plus denses (Figure 5.4a). Leur densité est éventuellement devenue supérieure à la densité des évaporites (Figure 5.4b,c). En raison de ce contraste de densité, et en raison de leur comportement visqueux attribuable aux pressions et températures élevées où elles étaient enfouies, les évaporites ont commencé à fluer vers la surface par flottation (Figure 5.4d). Ainsi, d'immenses cheminées de sel, appelées diapirs, se sont formées en même temps que les sédiments s'accumulaient.



**Figure 5.4 : Diagramme schématique expliquant la formation des diapirs. a) Des sédiments s'accumulent au-dessus d'une couche d'évaporite (sel). La densité des sédiments est moins grande que celle du sel. b) Les sédiments se compactent sous l'effet de l'accumulation des sédiments sus-jacents. Lorsque l'épaisseur des sédiments atteint 450-600 m d'épaisseur, leur densité est à peu près égale à celle du sel. c) Les sédiments se transforment en roche et leur densité devient supérieure à celle du sel. Le sel commence à fluer. d) Le sel remonte vers la surface par flottation et forme des diapirs de sel. Leur remontée cause la déformation des roches adjacentes. Adapté de Bourque (2010)**

La longue accumulation de sédiments dans le Bassin Madeleine a produit une épaisseur de roche sédimentaire considérable qui peut atteindre plus de 12 km en son centre. La Figure 5.1 présente l'épaisseur actuelle des roches sédimentaires pour l'ensemble du bassin, la position des diapirs, ainsi qu'une section schématique. Tel qu'il peut être observé sur cette figure, le noyau rocheux de plusieurs des îles de l'archipel est composé de diapirs. C'est d'ailleurs un de ces diapirs qui est exploité par les Mines Seleine. La remontée saline a aussi créé des pièges stratigraphiques favorables à l'accumulation d'hydrocarbures un peu partout dans le Bassin Madeleine, incluant les îles de la Madeleine, tel qu'indiqué sur la section A-A'.

### 5.1.1.2 Géologie des îles de la Madeleine

Les îles de la Madeleine sont situées en plein cœur du Bassin Madeleine. La coupe géologique schématique de la Figure 5.5 présente la structure géologique de l'archipel, ainsi que la séquence d'empilement des unités géologiques<sup>1</sup> et des roches correspondantes. Cependant, toutes les unités géologiques présentes dans le bassin et sur la coupe ne sont pas observables à la surface de l'archipel. En effet, les travaux de cartographie de Brisebois (1981) ont permis d'identifier quatre unités géologiques qui affleurent en surface. Elles sont regroupées en deux assemblages, séparés par une discordance, soit une coupure dans les dépôts géologiques attribuable à une absence de sédiments ou à leur érosion. Les formations du Havre aux Maisons et du Cap au Diable se composent de roches volcaniques, de brèches et d'évaporites et se retrouvent au centre des îles du Havre aux Maisons, du Cap aux Meules et du Havre Aubert sous forme de horst (bloc soulevé). La Formation du Cap aux Meules est composée de roches sédimentaires et forme les plateaux entourant les buttes des îles précédentes et la totalité des autres îles rocheuses.

<sup>1</sup> Une unité géologique (ou stratigraphique) correspond à un assemblage de plusieurs lithologies (types de roches) de nature différente. Ces unités sont divisées sur la base de l'âge des roches et de l'environnement dans lequel elles se sont formées.

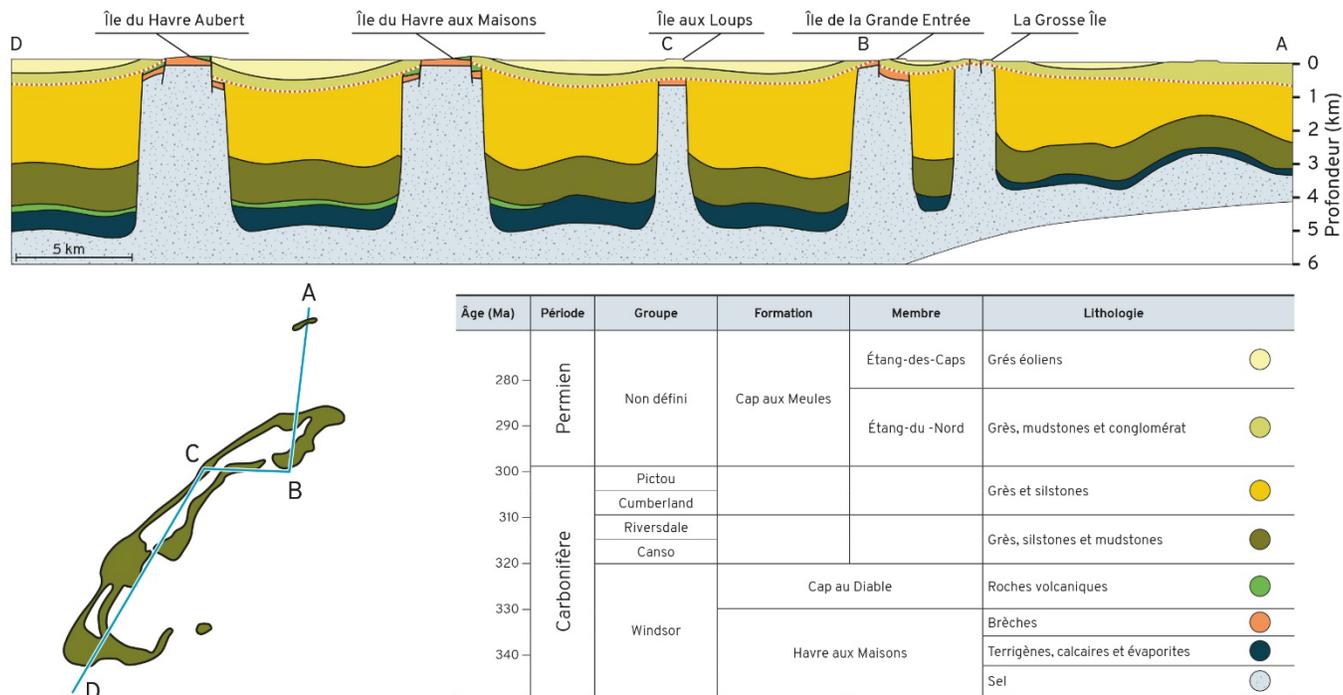
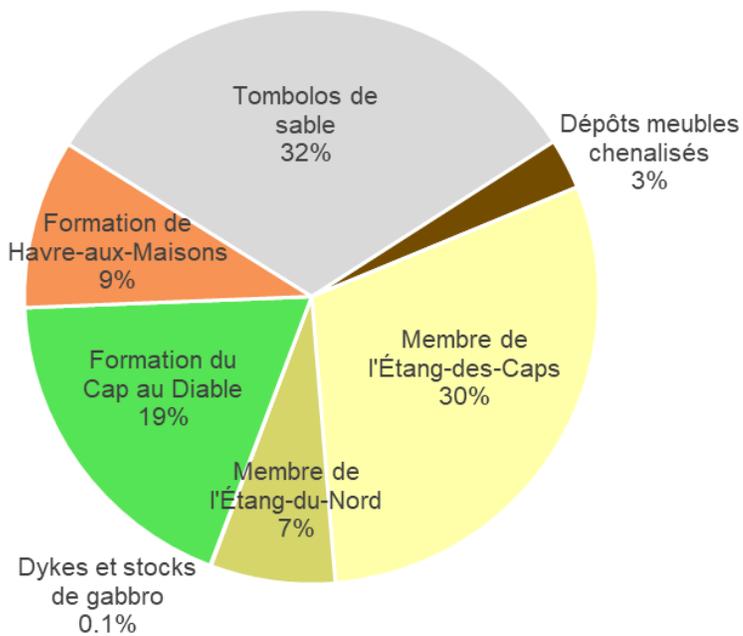
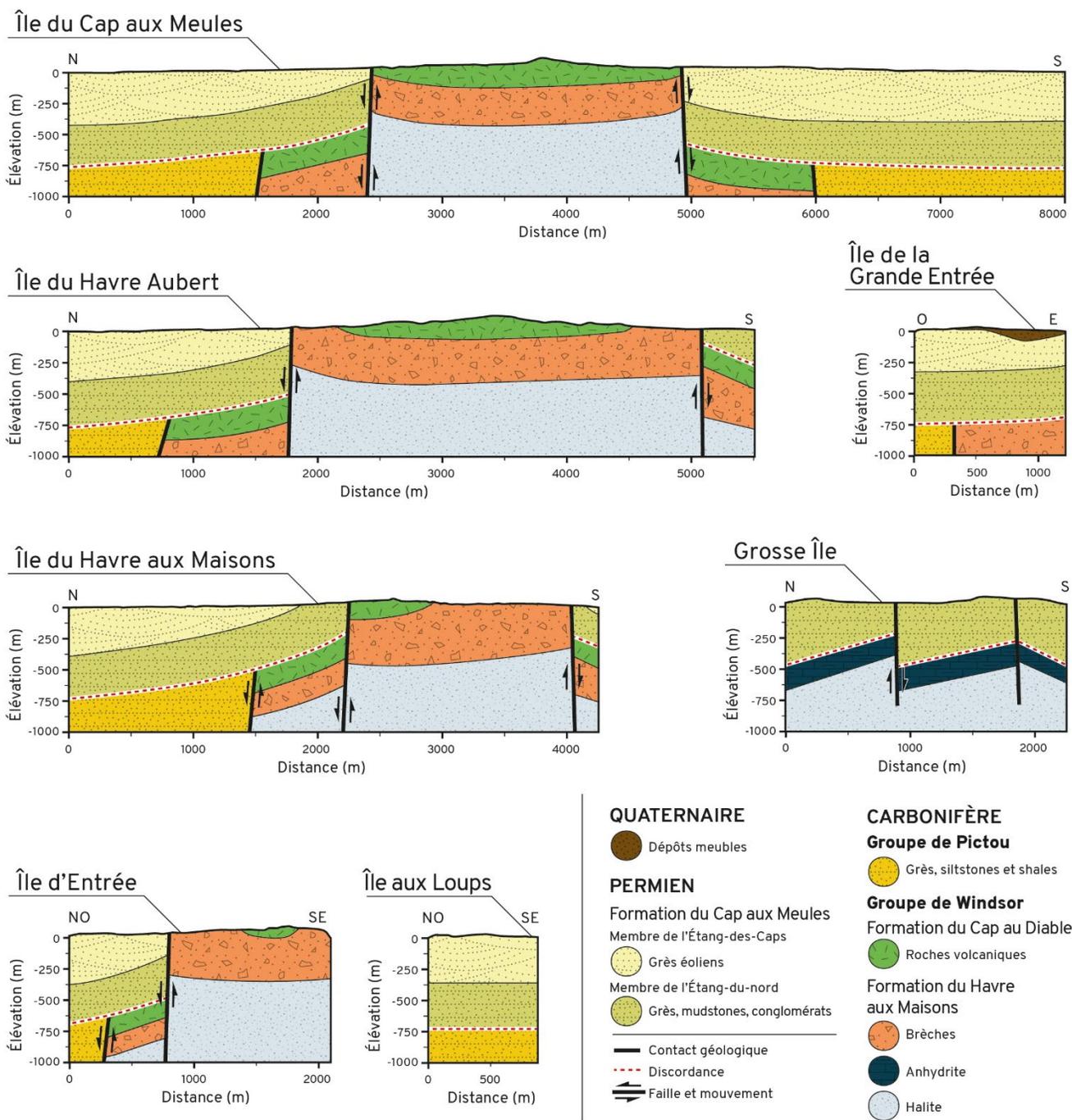


Figure 5.5 : Coupe géologique schématique des îles de la Madeleine et colonne stratigraphique (adapté de Brisebois, 1981)

La Carte 16 : Géologie du socle rocheux et coupes géologiques, en annexe électronique, montre les lithologies de surface du socle rocheux ainsi que les structures géologiques principales. Ces informations sont illustrées de manière simplifiée à la Figure 5.8. Les données proviennent de la cartographie de Brisebois (1981), à l'échelle 1 : 50 000. Elles ont été obtenues du Système d'information géominière (SIGÉOM) du MERN. La Figure 5.6 montre les proportions du territoire couvert par les différentes unités géologiques. Des coupes géologiques spécifiques à plusieurs des îles sont présentées à la Figure 5.7 et sont reprises sur la Carte 16. Les traces des coupes sont localisées à la Figure 5.8. Une description plus détaillée de chacune des unités géologiques est présentée dans les sections suivantes. Toutes ces descriptions proviennent de Brisebois (1981). Les unités non rocheuses, soit les tombolos de sable et les dépôts meubles chenalisés, sont décrites à la Section 5.1.2.1.



**Figure 5.6 : Proportion des unités géologiques présentes aux îles de la Madeleine**



**Figure 5.7 : Coupes géologiques des principales îles de l'archipel. Les coupes des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, de la Grande Entrée et la Grosse Île sont tirées de Brisebois (1981), tandis que les autres ont été préparées dans le cadre de cette étude**

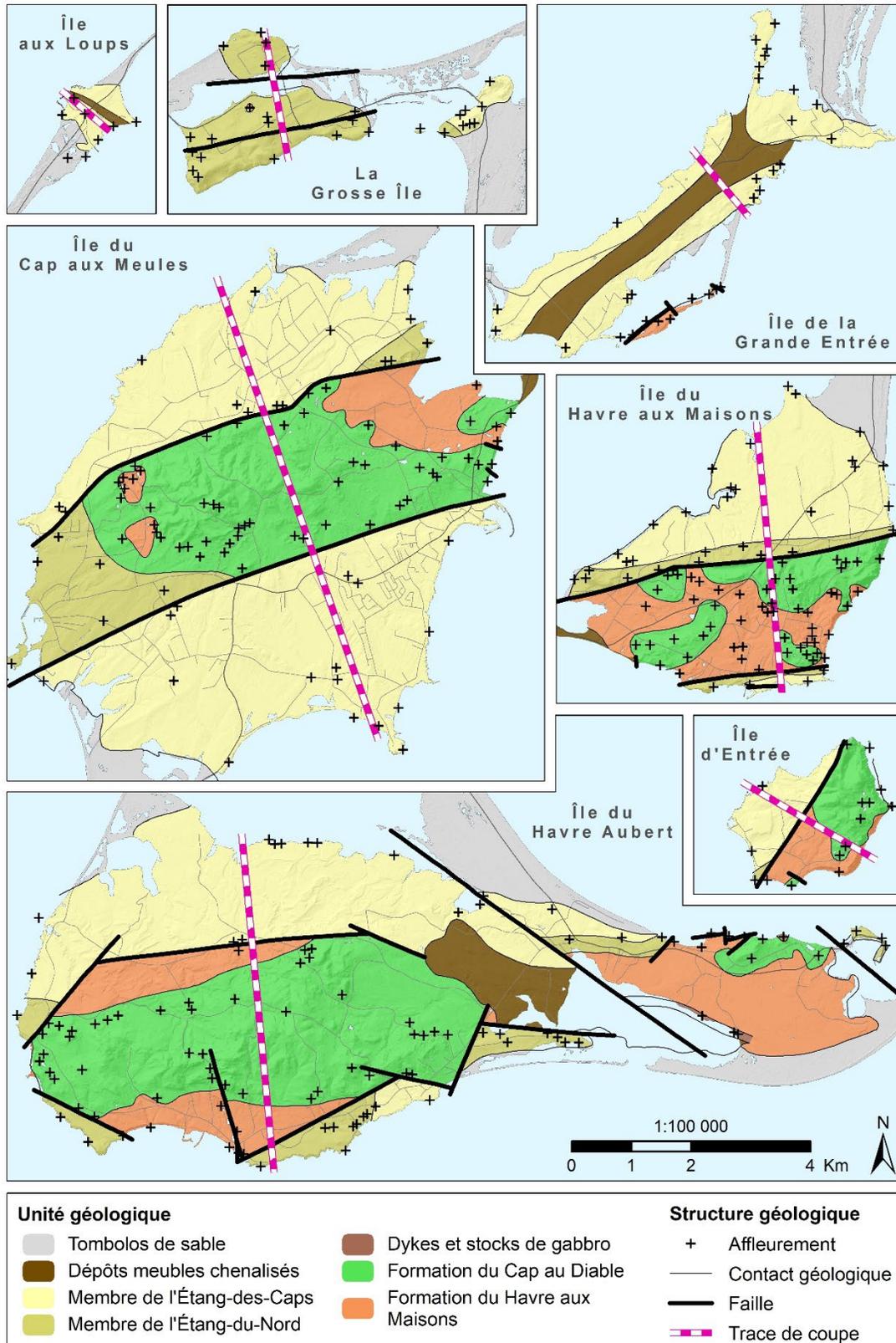
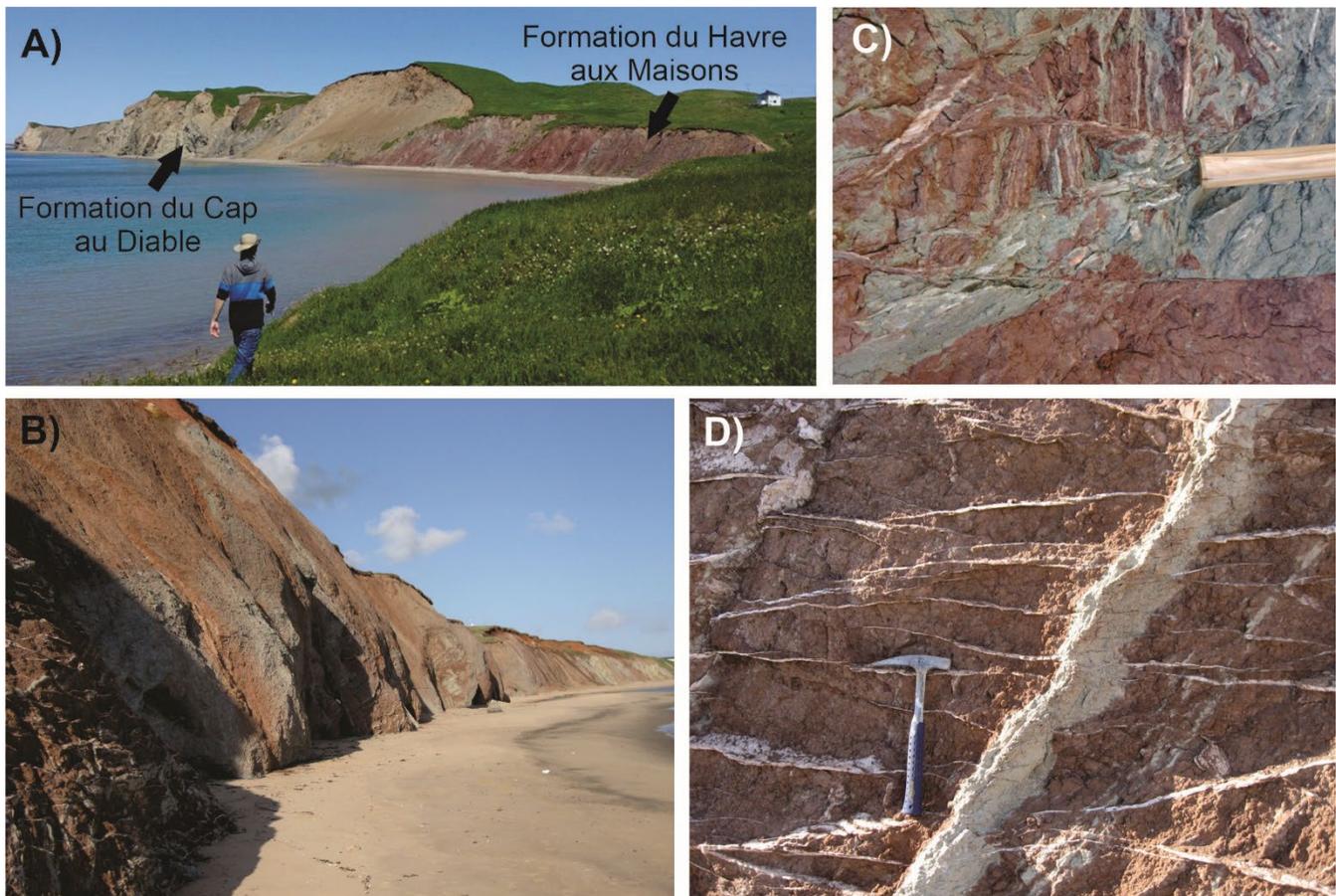


Figure 5.8 : Géologie du socle rocheux et traces des coupes géologiques

### *Formation du Havre aux Maisons*

La Formation du Havre aux Maisons, mise en place au Carbonifère inférieur, est une séquence formée d'évaporites à la base, suivie de roches terrigènes, puis de calcaires. De manière plus spécifique, elle est composée de 50 à 80% de mudstones, 5 % de roches volcano-clastiques, de 5 % d'évaporites (mais 70 % à la base de la formation) et de 10 % de roches carbonatées et de roches volcaniques. Il s'agit de la séquence sédimentaire qui s'est déposée au-dessus des évaporites lagunaires, au début de la formation du Bassin Madeleine au Carbonifère. Toutefois, les roches de cette formation ne sont pas bien stratifiées et se présentent comme une brèche d'effondrement associée à la dissolution des évaporites sous-jacentes. Ainsi, les roches se présentent sous la forme d'un amas de fragments tabulaires ou irréguliers et anguleux, de 1 mm à plus de 100 m de diamètre, contenus dans une matrice argileuse. Cette formation est caractérisée par une allure chaotique qui ne présente ni texture ni structures sédimentaires. On y retrouve également de nombreuses veines de gypse. Des photos de cette formation sont présentées à la Figure 5.9. L'épaisseur de cette formation n'est pas connue avec précision, mais pourrait atteindre plusieurs centaines de mètres.

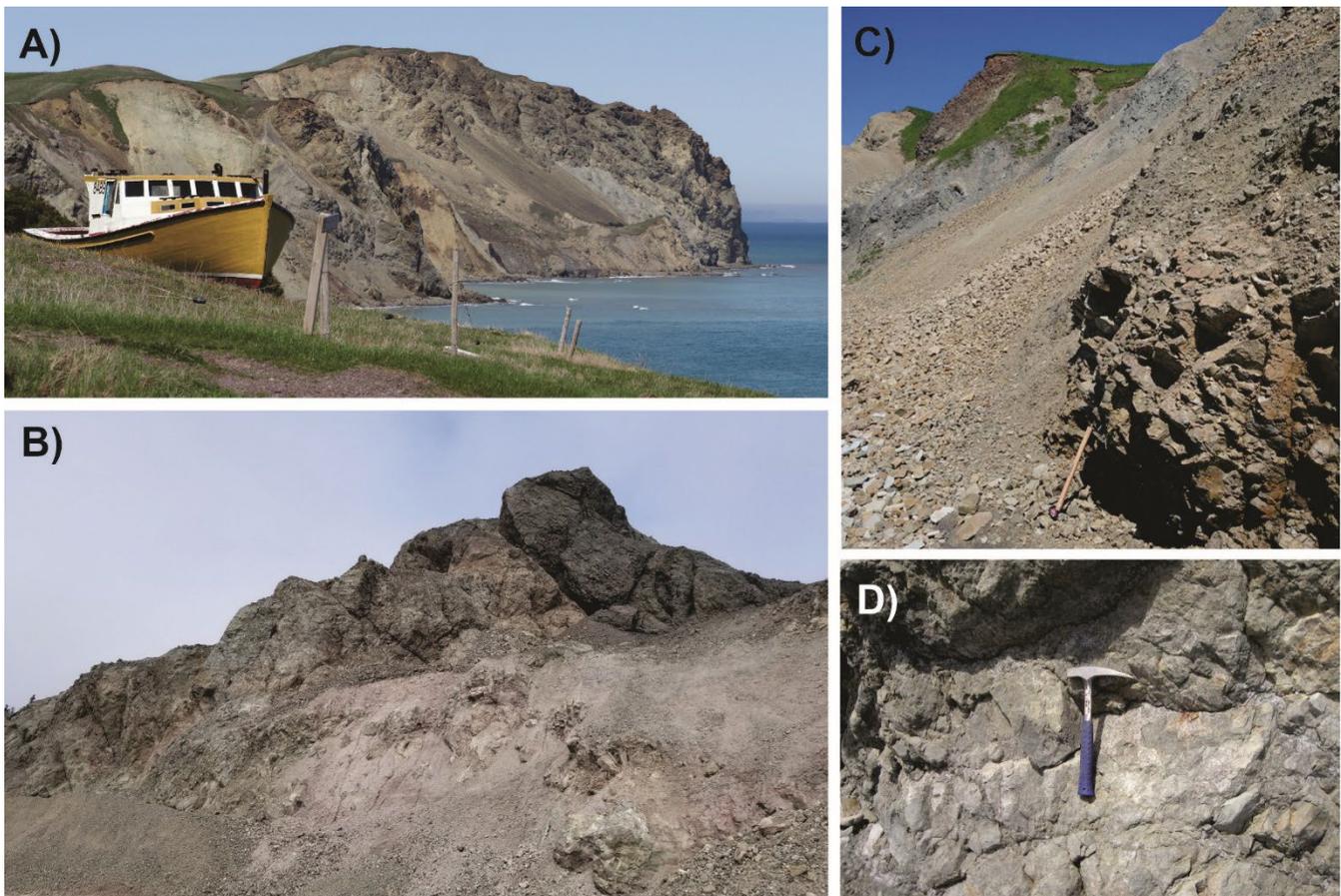
La base de la formation est constituée d'épaisse couches de sels avec des intercalations d'anhydrite et de brèche. Le sommet de la formation, est soit recouvert en concordance par les basaltes de la Formation du Cap au Diable, soit tronqué par une discordance angulaire sur laquelle reposent les grès de la Formation du Cap aux Meules. Cette formation affleure au sommet des diapirs, principalement dans les horsts formant les buttes centrales des îles du Cap aux Meules, de Havre aux Maisons et du Havre Aubert, et à l'île d'Entrée. Elle couvre 9 % du territoire d'étude et 14 % des îles rocheuses.



**Figure 5.9 : Photos de la Formation du Havre aux Maisons. A) Vue générale d'un affleurement comprenant la Formation du Havre aux Maisons et la Formation du Cap au Diable. B) Vue rapprochée d'un affleurement de la Formation du Havre aux Maisons. C) Vue agrandie de l'affleurement. D) Vue sur des veines de gypse dans l'affleurement**

### *Formation du Cap au Diable*

La Formation du Cap au Diable, d'âge carbonifère, est superposée à la séquence sédimentaire de la Formation du Havre aux Maisons. Elle est composée principalement de laves volcaniques de composition basaltique, avec de rares lits de calcaire cristallin. Les roches de cette formation sont généralement très fracturées et les fractures sont communément comblées par des minéraux secondaires comme la calcite, l'hématite, le quartz, l'épidote ou le gypse. On retrouve cette formation dans les horsts formant les buttes centrales des îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, du Havre Aubert, et d'Entrée. Elle occupe 19 % de l'archipel, plus précisément 28 % des îles rocheuses. L'épaisseur de cette formation n'est pas connue avec précision, mais des épaisseurs allant jusqu'à 150 m ont été observées. La Figure 5.10 présente des photos de cette formation.



**Figure 5.10 : Photos de la Formation du Cap au Diable. A) Vue générale d'un affleurement de la Formation du Cap au Diable. B) et C) Les roches de cette formation sont très fracturées en surface et sujet à l'érosion. D) Vue rapprochée d'un affleurement de basalte**

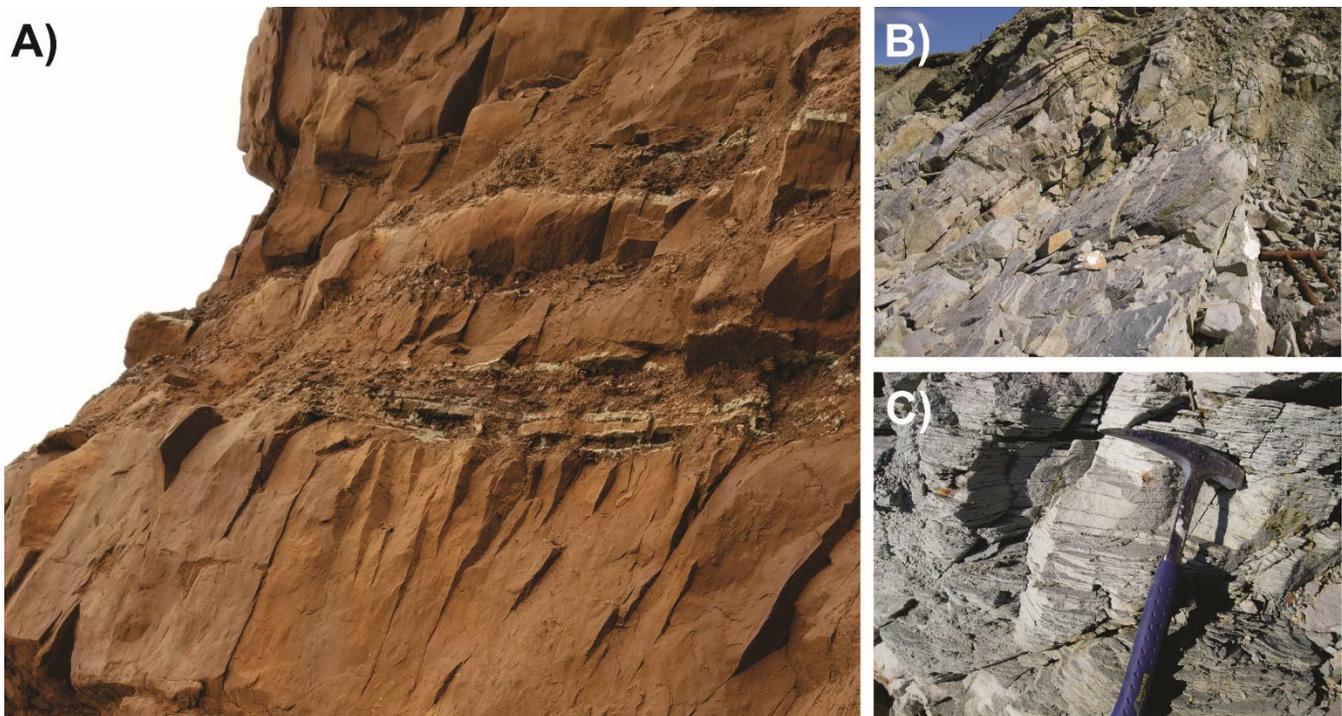
### *Formation du Cap aux Meules*

La Formation du Cap aux Meules, datant du Permien, est caractérisée par un environnement de déposition continental dans un climat désertique. Elle est composée de sédiments terrigènes de couleur rouge et gris vert et de quelques lits de calcaire qui reposent en discordance d'érosion sur les roches des formations du Havre aux Maisons et du Cap au Diable. Ces roches sédimentaires affleurent autour

des horsts formant les buttes centrales et constituent le contexte géomorphologique du plateau de grès. Elles couvrent 37 % du territoire d'étude et 54 % de la surface des îles rocheuses.

La formation a été divisée en deux unités, soit le Membre de l'Étang-du-Nord et le Membre de l'Étang-des-Caps. Ces deux membres sont constitués d'un assemblage de roches légèrement différentes qui sont caractéristiques de leur environnement de déposition.

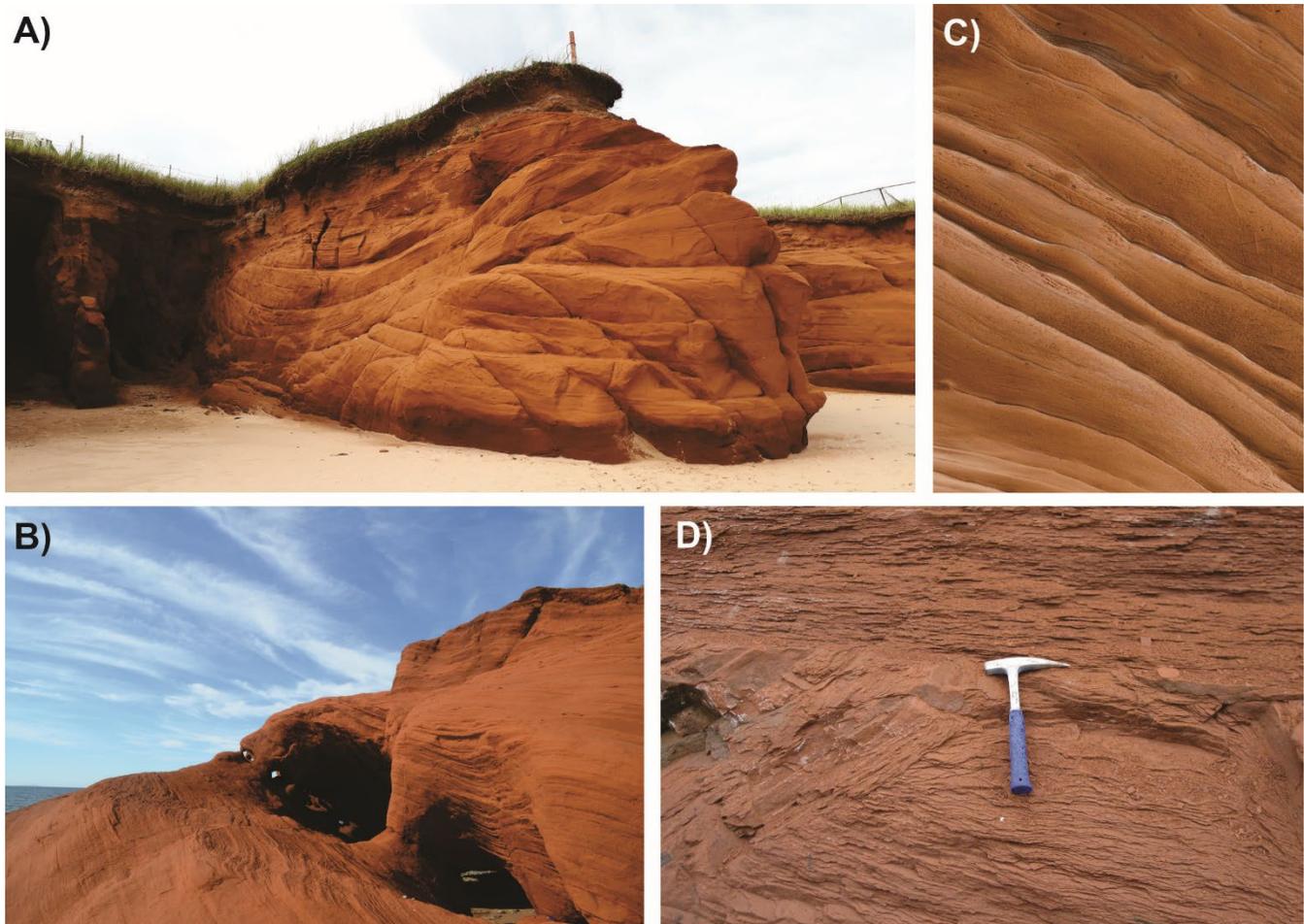
Les roches du Membre de l'Étang-du-Nord sont constituées majoritairement de grès (80 %), de mudstones (12 %), de siltstones (8 %) et d'une très faible proportion de calcaire et conglomérat (moins de 1 %). Ces roches se sont déposées dans des environnements de déposition fluviatile, éolienne et de lacs éphémères (playa), en milieu désertique. Le grès rouge à ciment d'hématite est poreux et friable. Le grès gris-vert, cimenté par de la calcite, est moins poreux et résiste mieux à l'érosion. L'épaisseur de ce membre est d'environ 300 m. La Figure 5.11 présente des photos de ce membre qui occupe 7 % du territoire d'étude.



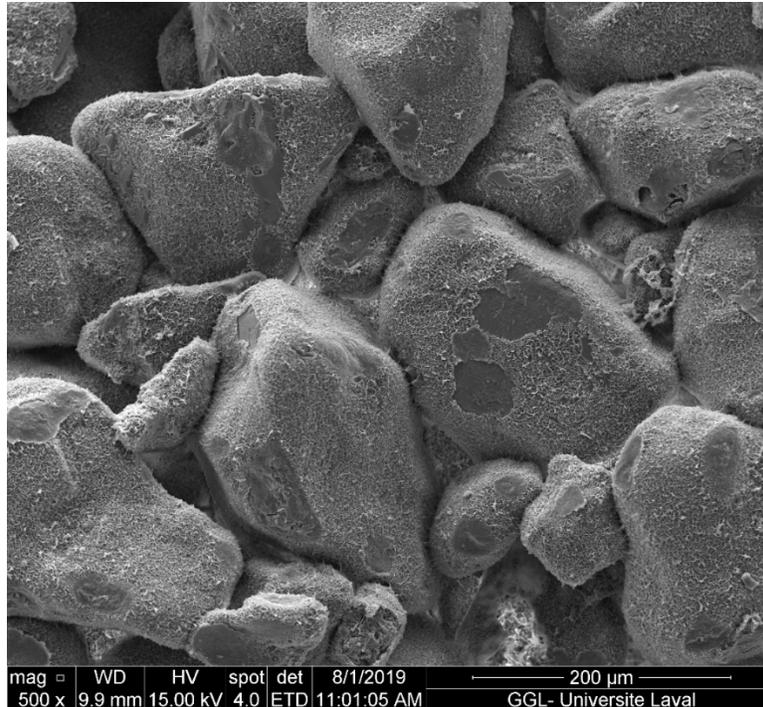
**Figure 5.11 : Photos du Membre de l'Étang-du-Nord. A) Strates de grès rouge de taille métrique interlitées de mudstone et siltstone. B) et C) Lithologies de mudstone et siltstone.**

Les roches du Membre de l'Étang-des-Caps sont composées entièrement de grès à grain fin ou très fin et d'un peu de siltstone rouge et accessoirement gris-vert. Il s'agit des roches communément appelées les grès rouges, bien que les roches du Membre de l'Étang-du-Nord peuvent également avoir cette couleur. La caractéristique dominante du Membre de l'Étang-des-Caps est l'uniformité de la géométrie des matériaux. Ceux-ci correspondent à un empilement de dunes de sable fossilisées. Des stratifications obliques géantes, dont les tailles varient de 0,5 mm à 10 cm de largeur sur 10 cm à 20 m de longueur, sont réparties sur toute l'épaisseur de l'unité géologique et sont un élément distinctif de ce membre. L'épaisseur totale de ce membre, qui couvre 30 % du territoire d'étude, est d'environ 300 à 325 m. Des

photos de ces grès sont montrées à la Figure 5.12. Ces grès sont très poreux et friables. Une photographie au microscope à balayage électronique avec un grossissement de 500 illustre la forme des grains de sable arrondis, et la faible quantité de ciment qui les lient (Figure 5.13).



**Figure 5.12 : Photos du Membre de l'Étang-des-Caps. A) Stratifications obliques géantes. B) Structures d'érosion typiques observées sur la côte (référence de la photo, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine). C) Vue rapprochée des grès illustrant l'épaisseur des lits. D) Vue rapprochée d'affleurement illustrant les stratifications obliques**



**Figure 5.13 : Photographie au microscope à balayage électronique d'un échantillon des grès du Membre de l'Étang-des-Caps montrant la taille des grains ainsi que le ciment et les points de contact entre les grains. Grossissement de 500**

### **5.1.1.3 Géologie structurale**

La distribution des roches sur l'archipel est contrôlée par un réseau de failles subverticales qui délimitent des blocs affectés de mouvements verticaux appelés horsts. Sur les îles du Cap aux Meules, Havre Aubert et Havre aux Maisons, ces horsts sont constitués de roches déformées, fracturées et bréchiques des formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons, qui percent les strates essentiellement horizontales de la Formation du Cap aux Meules. Les horsts et les failles sont associés à la formation des diapirs, tel que décrit précédemment. Leur formation a causé la déformation des roches encaissantes de la Formation du Cap aux Meules. Ces dernières présentent un pendage plus ou moins important à proximité des failles.

Les formations du Havre aux Maisons et du Cap au Diable sont affectées par un réseau de fractures complexe sans orientation préférentielle. Dans la Formation du Havre aux Maisons, elles sont généralement remplies de gypse, tandis que celles de la Formation du Cap au Diable contiennent surtout de la calcite, un peu de silice et d'hématite. Dans la Formation du Cap aux Meules, il existe un réseau de fractures bien développé parallèle à la direction des horsts. Un second réseau de fractures orthogonales moins bien développé est observé sur certains affleurements.

### **5.1.1.4 Topographie du roc**

L'élévation du socle rocheux s'obtient de la soustraction de l'élévation du modèle altimétrique numérique (Carte 5 – Section 2.3.1) par l'épaisseur des dépôts meubles (Carte 19 – Section 5.1.2.2). La topographie du roc est présentée, à une résolution de 20 m, à la Carte 17 : Élévation du socle rocheux, en annexe électronique, et à la Figure 5.14, accompagnée des observations d'élévation du roc utilisées pour

produire la carte. La fiabilité des résultats d'un secteur dépend directement de la densité des observations dans ce secteur. La méthodologie ayant permis d'estimer l'épaisseur des dépôts meubles est détaillée un peu plus loin à la Section 5.1.2.2.

Le socle rocheux présente une topographie très similaire au modèle altimétrique numérique de surface (Section 2.3.1), avec les élévations les plus importantes sur les buttes centrales, et une diminution graduelle vers les côtes. Le relief est plus accidenté au centre des îles et forme un plateau plus plat sur leur pourtour. Les élévations du roc varient de -85 m à 167 m par rapport au niveau moyen de la mer. Les élévations négatives, sous le niveau marin, se retrouvent aux endroits où les dépôts meubles sont les plus épais (Section 5.1.2.2), soit dans la vallée enfouie de l'île de la Grande Entrée, dans le secteur du port de Grosse-Île et dans le secteur à l'ouest du Bassin sur l'île du Havre Aubert. En bordure de mer, l'élévation du roc est en général de l'ordre de 10 à 15 m et forme fréquemment des falaises abruptes.

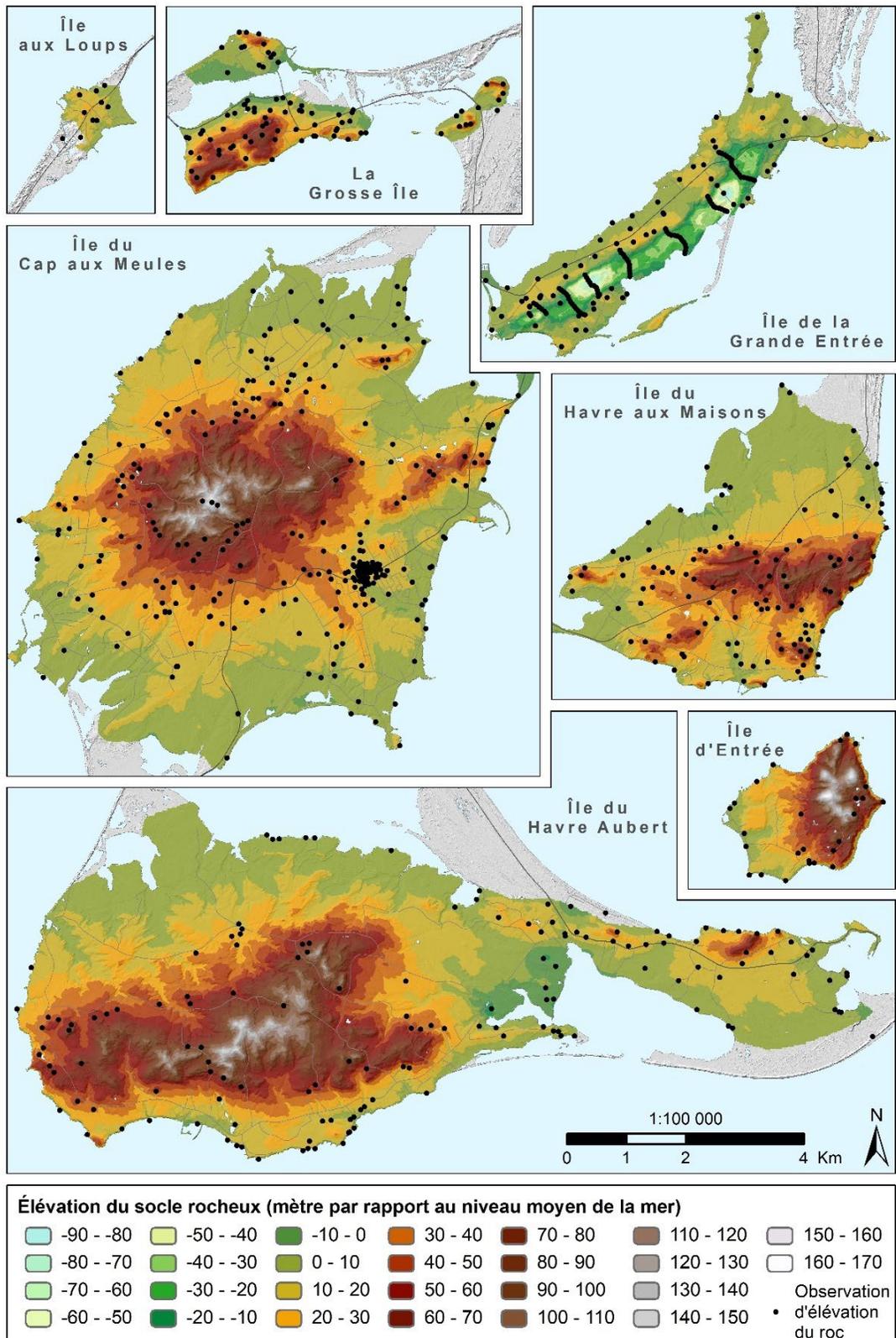
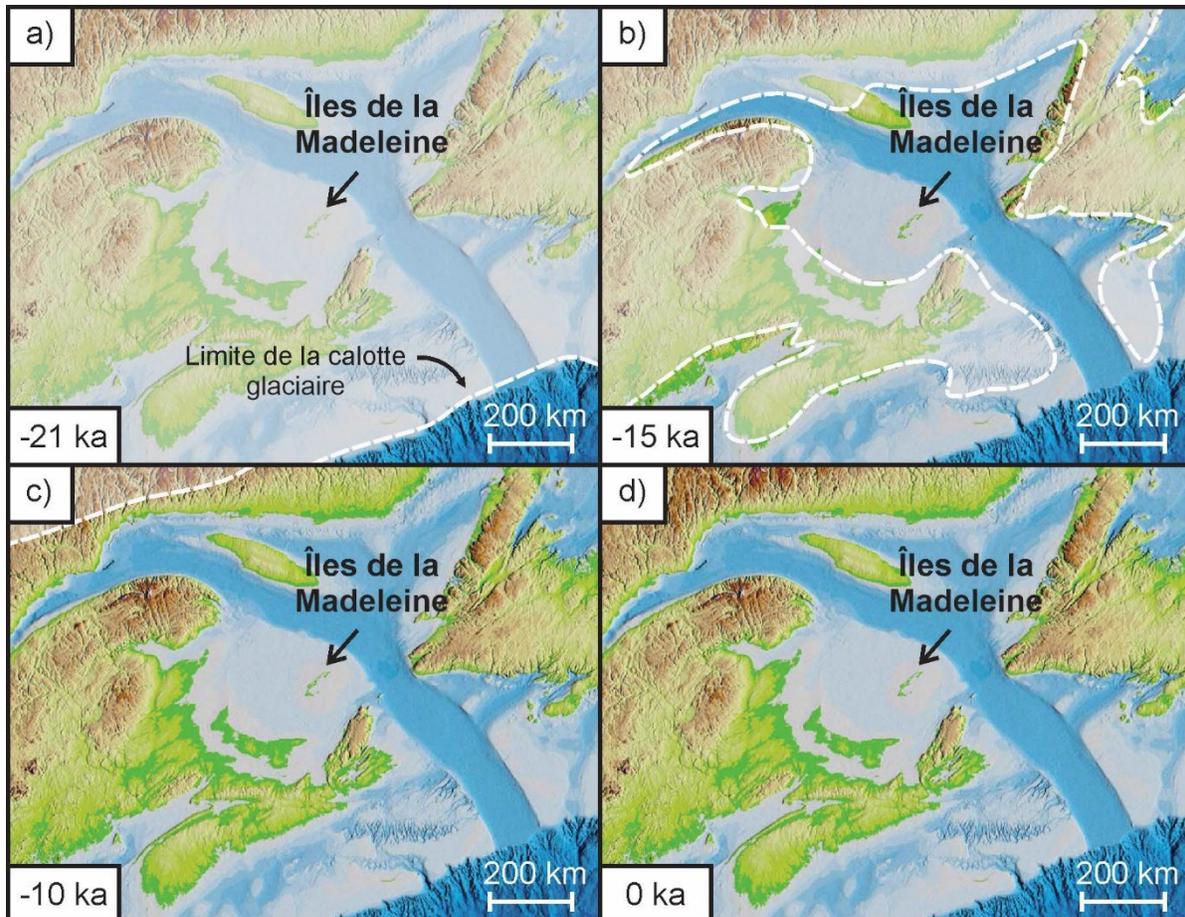


Figure 5.14 : Estimation de l'élévation du socle rocheux

### 5.1.2 Géologie du Quaternaire

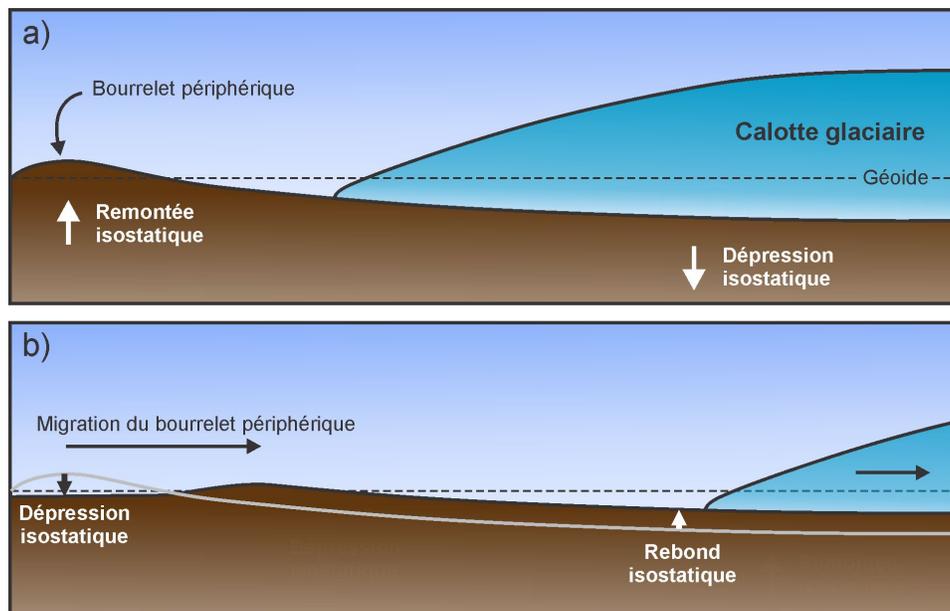
L'histoire géologique récente des îles de la Madeleine a fait l'objet de nombreux débats, dont le sujet principal était de savoir si l'archipel a été recouvert ou non par les glaciers formant la calotte glaciaire de l'Inlandsis Laurentien lors de la dernière période glaciaire (voir Mercier-Rémillard, 2016, pour une revue détaillée des débats). Les travaux les plus récents suggèrent que oui, même si la chronologie et la dynamique d'englacement ne sont pas encore bien comprises. La Figure 5.15 présente une chronologie simplifiée de la position de la calotte glaciaire entre le dernier maximum glaciaire (-21 ka) jusqu'à maintenant (0 ka).



**Figure 5.15 : Chronologie glaciaire du Golfe du Saint-Laurent à la fin du Quaternaire. a) Étendue maximale des glaciers au dernier maximum glaciaire (-21 ka). L'archipel est complètement recouvert par la glace. b) Marge glaciaire vers -15 ka. L'archipel est libre de glace. c) Marge glaciaire vers -10 ka. d) Au temps présent, la marge de la calotte glaciaire a complètement disparu de la région. Modifié de Mercier-Rémillard et coll. (2016) et Shaw et coll. (2002)**

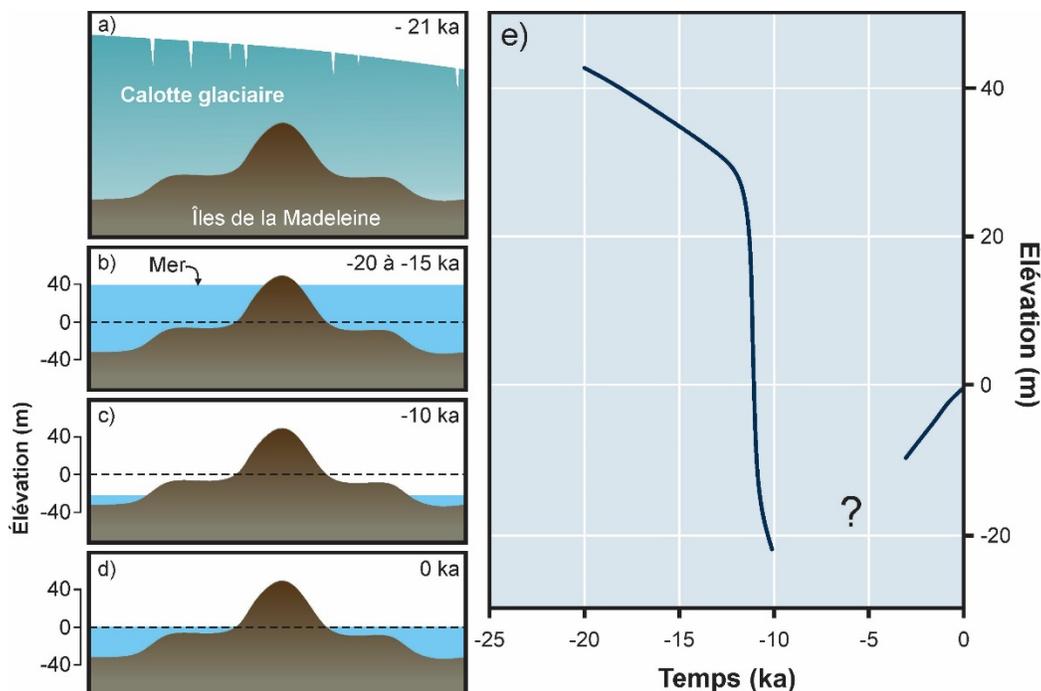
Au dernier maximum glaciaire, le poids de la calotte glaciaire était suffisamment important pour causer un affaissement de la croûte terrestre (Figure 5.16a). En réponse à cet affaissement, les régions périphériques à la calotte glaciaire ont au contraire remonté pour former un bourrelet périphérique. Lors de la fonte des glaces, la croûte s'est réajustée pour reprendre sa forme originale. Ainsi, un rebond isostatique s'est produit là où le glacier était présent, et le bourrelet périphérique a fait l'objet d'une

dépression isostatique et/ou s'est déplacé progressivement latéralement (Figure 5.16b). Ces mouvements verticaux de la lithosphère (isostasie) conjugués à la variation du niveau des mers associée à la fonte des glaciers (eustasie) ont causé des fluctuations complexes du niveau marin relatif.



**Figure 5.16 : Schématisation du phénomène d'isostasie. a) Enfoncement de la croûte terrestre (dépression isostatique) et formation du bourrelet périphérique (remontée isostatique) en marge du glacier. b) Dépression isostatique en raison de l'affaissement et de la migration du bourrelet périphérique et remontée isostatique en raison de la fonte du glacier. Adapté de Oakley et Boothroyd (2012) et Rémillard-Mercier (2016)**

Tel que mentionné précédemment, au dernier maximum glaciaire (-21 ka), l'archipel était recouvert de glace (Figure 5.17a). Les glaciers ont ensuite commencé à se retirer, et entre -20 ka et -15 ka, les îles de la Madeleine sont devenues complètement dénudées de glace. Elles sont alors devenues partiellement submergées par la mer, avec seulement la partie la plus haute des grandes îles qui émergeaient de l'eau (Figure 5.17b). Il s'agit de la limite marine la plus élevée atteinte sur l'archipel récemment, avec un niveau d'environ 40 m supérieur au niveau marin actuel (Mercier-Rémillard et coll., 2017). Ensuite, le niveau relatif de la mer a descendu et vers -10 ka, le niveau des mers le plus bas, environ 20 m sous le niveau actuel, a été atteint (Figure 5.17c). Tout l'archipel tel qu'on le connaît aujourd'hui était alors émergé. À partir de ce moment, le niveau des mers a progressivement remonté pour atteindre le niveau actuel à 0 m (Figure 5.17d). La courbe d'émergence qui décrit le niveau relatif de la mer lors de cette période par rapport au niveau présent de la mer est présentée à la Figure 5.17e.



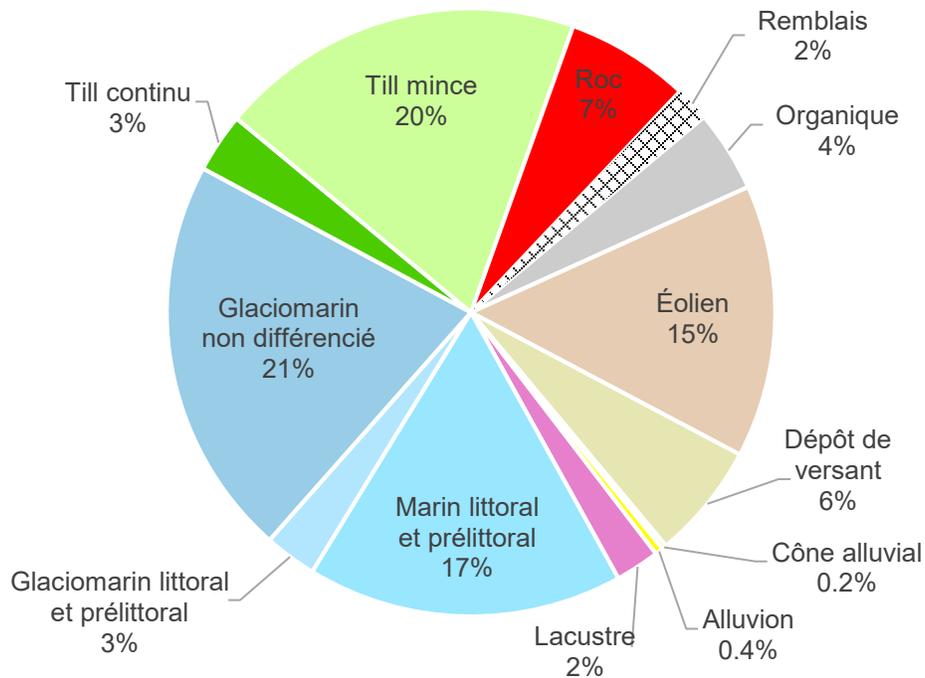
**Figure 5.17 : Coupes schématiques illustrant l’histoire géologique récente de l’archipel et les variations relatives du niveau marin par rapport au niveau actuel : a) -21 ka, b) -20 à -15 ka, c) -10 ka et d) 0 ka (présent). e) Courbe d’émergence des îles de la Madeleine qui décrit l’élévation du niveau marin par rapport au niveau actuel depuis le dernier maximum glaciaire jusqu’à maintenant (modifié de Mercier-Rémillard et coll., 2017)**

### 5.1.2.1 Description des dépôts meubles

La Carte 18 : Géologie des formations superficielles, en annexe électronique, présente les dépôts meubles observés en surface par Dubois et Parent (en révision) et les éléments morphologiques. Les données cartographiques ont été obtenues du SIGÉOM du MERN. La Figure 5.18 montre les proportions du territoire d’étude occupé par les différentes formations géologiques superficielles. Celles-ci sont illustrées, pour les îles principales à la Figure 5.19.

Les dépôts de versant et du roc affleurant se retrouvent principalement sur les buttes centrales des îles de la Grande Entrée, du Havre aux Maisons et du Cap aux Meules. Ces deux formations géologiques superficielles comptent respectivement pour 6 et 7 % du territoire d’étude. Le roc affleurant s’observe aussi fréquemment formant des falaises en bordure de mer. Sur les plateaux de grès, des sédiments marins et glaciomarins, parfois littoraux et pré-littoraux, mais souvent non différenciés, dominent largement (41 % du territoire). Sur le plateau au sud de l’île du Cap aux Meules, on observe aussi un secteur de till mince et un cône alluvial à proximité. Sur l’île du Havre Aubert, le till domine presque partout, avec quelques secteurs de roc affleurant et de petites zones de dépôts alluviaux chenalisés. Le till, continu ou non, occupe 23 % du territoire d’étude, tandis que les sédiments alluviaux en représentent moins de 1 %. Des poches de sédiments organiques localisés, couvrant 4 % du territoire, sont observées sur les îles rocheuses, surtout en zone côtière. Sur les cordons dunaires, ce sont des sédiments éoliens qui forment les dunes (15 % du territoire), accompagnés de sédiments marins littoraux et pré-littoraux récents. Les sédiments lacustres occupent les localisations des plans d’eau intérieurs des cordons dunaires (2 % du territoire). Enfin, des remblais (2 % du territoire) sont cartographiés aux zones fortement

anthropisées, notamment autour des installations portuaires de Cap-aux-Meules et au droit de l'aéroport sur l'île du Havre aux Maisons.



**Figure 5.18 : Proportion des formations géologiques superficielles**

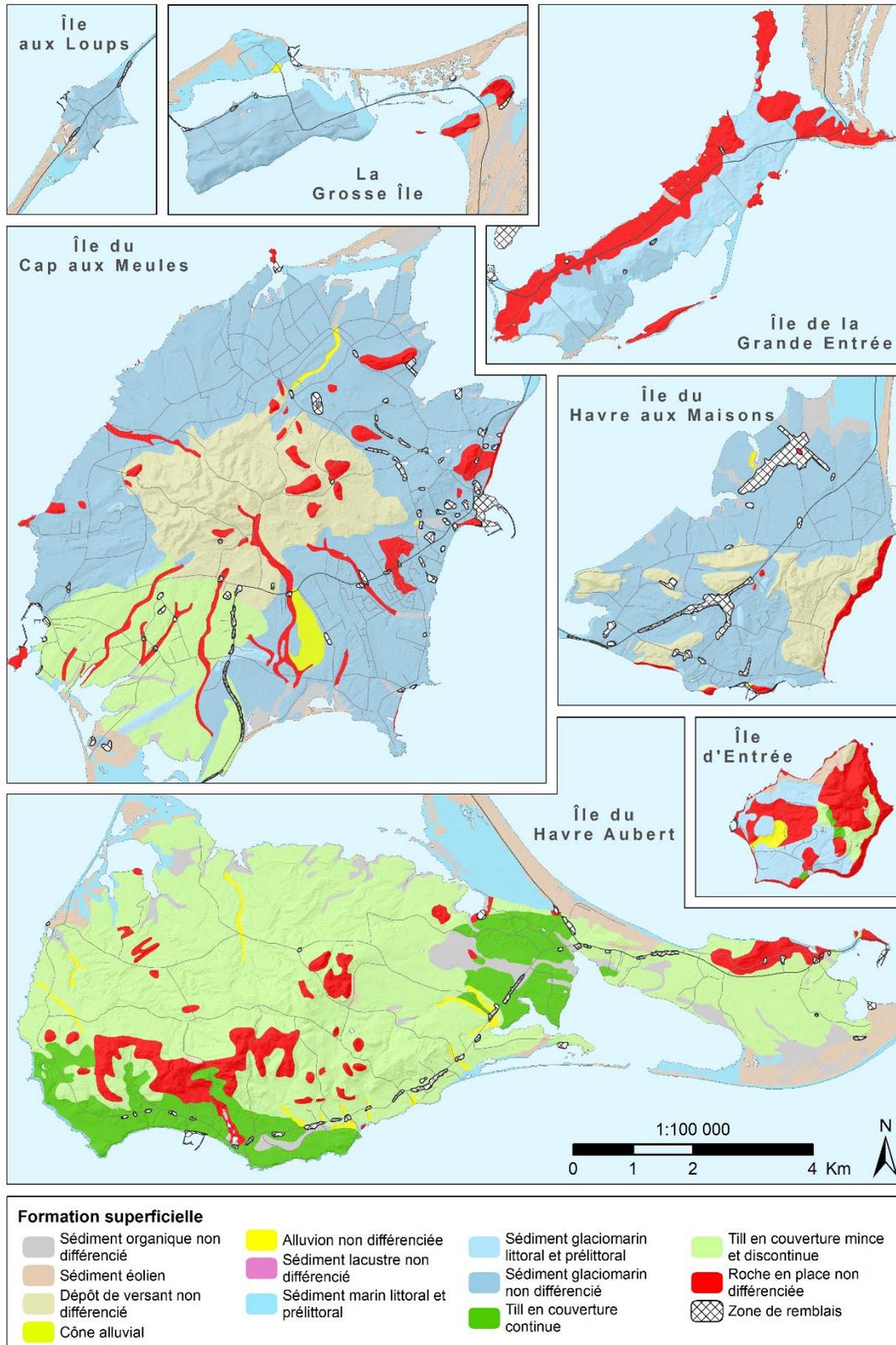


Figure 5.19 : Géologie des formations superficielles

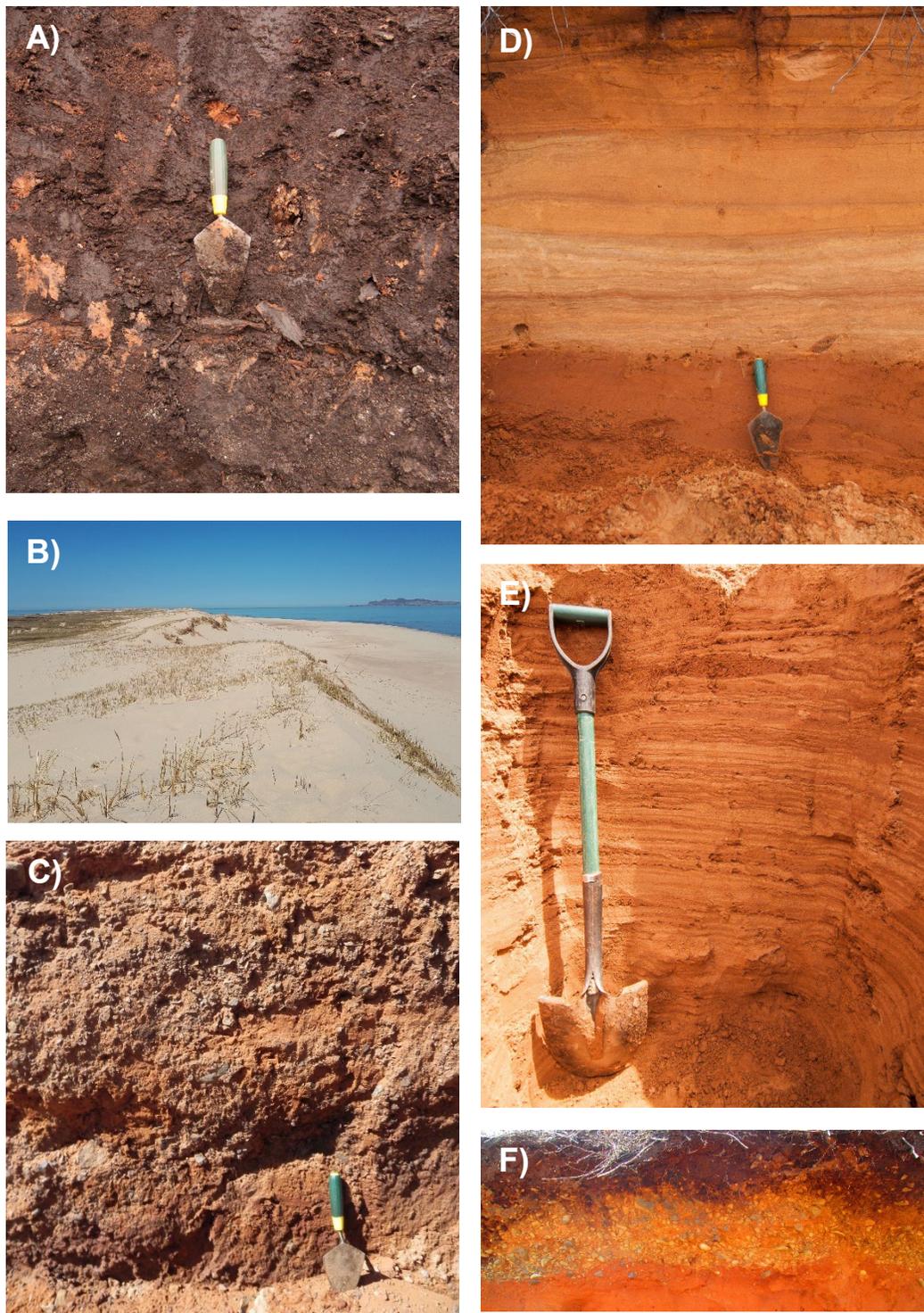
Les aquifères sont considérés comme non confinés partout sur le territoire d'étude, car à l'exception des sédiments organiques, les dépôts meubles de surface sont tous relativement perméables. Des sédiments fins comme des argiles n'ont été observés que localement dans les zones de till continu, au sud et à l'est de l'île du Havre Aubert (M. Parent, communication personnelle, 2020). Le till est perméable, car composé d'une matrice à dominance de sable fin, avec un peu de silt et présence de cailloux (Figure 5.20e). Même chose pour les sédiments lacustres et glaciomarins non différenciés, constitués de sables plutôt fins, avec des cailloux et un peu de gravier. La perméabilité des sédiments littoraux et pré-littoraux, formés de sable et gravier bien triés (Figure 5.20b), est probablement plus élevée (M. Parent, communication personnelle, 2020). Enfin, les sédiments alluviaux, de même que les sédiments éoliens, sont composés essentiellement de sable (Figure 5.20c,d).

Les empilements de sédiments, généralement minces, sont rares aux îles de la Madeleine. Une couche de sédiment distinct a été observée sur le terrain au-dessus du till à l'île du Havre Aubert, mais cette couche serait trop mince pour être cartographiée (M. Parent, communication personnelle, 2020). Des dépôts anciens ont aussi été observés sous le till continu près du croisement de la Route 199 et du Chemin du Bassin sur l'île du Havre Aubert (M. Parent, communication personnelle, 2020).

Sur l'île de la Grande Entrée, on retrouve une vallée remplie de sédiments glaciaires décrits comme des dépôts chenalisés de gravier, sable, silt et argile sur la carte géologique tracée par Brisebois (1981) (Carte 16). Cette vallée enfouie, positionnée au centre de l'île s'étend du nord-est au sud-ouest sur environ 5 km, et ferait de 400 à 500 m de large. Aucune coupe affleurante de ces dépôts n'étant disponible, les sédiments ne peuvent être caractérisés que par les échantillons recueillis lors de forages. Quatre puits d'observation ont été forés dans cette unité par le MELCC pour leur intégration au RSESQ en 2015 (voir la localisation à la Figure 5.23). Les puits F-1 à F-4 atteignent tous le roc à des profondeurs respectives de 6, 34, 100 et 62 m. Les schémas d'aménagement de ces puits sont présentés à l'Annexe 8. Les descriptions des séquences stratigraphiques observées lors du forage, telles que décrites dans les schémas d'aménagement des puits, y sont aussi reprises sous forme de tableaux. Elles sont accompagnées des descriptions effectuées par M. Parent, co-auteur de la cartographie des formations géologiques superficielles, des échantillons des sédiments récoltés à tous les 5 pieds (environ 1,5 m), sauf exception, lors des forages. De façon générale, les sédiments sont des sables fins contenant parfois des grains plus grossiers comme des graviers et des cailloux. À la seule exception de couches de sables moyens à fins légèrement silteux près de la surface au puits F-3, aucune particule plus fine que le sable n'a été observé lors des forages et lors de l'analyse des échantillons. Les quatre puits d'observation étant situés dans le même secteur de l'île de la Grande Entrée, ils pourraient ne pas être représentatifs de l'ensemble de la vallée de sédiments.

La même unité de dépôts meubles chenalisée est présente à trois autres endroits sur la carte de la géologie du socle rocheux (Carte 16) : sur les pointes Nelson et à Mounette des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons, reliées à cet endroit par le pont du Havre-aux-Maisons de la route 199, à l'île du Havre Aubert, au sud du secteur du Portage-du-Cap, et dont la moitié de l'unité serait submergée par Le Bassin, et sur l'île aux Loups, traversant de part et d'autre l'île du nord-ouest au sud-est sur environ 1 km de long, et sur une largeur de 100 à 150 m. Sur cette dernière île, une coupe affleurante d'une dizaine de mètres de hauteur est accessible à l'extrémité nord-ouest de l'unité, en bordure de mer (Figure 5.20a). On y observe des dépôts marins sableux sur la moitié superficielle, qui semblent relativement uniforme, identifiés comme des sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux sur la carte de la géologie

des formations superficielles (Carte 18). Les sédiments sous-jacents sont plus hétérogènes, constitués d'une matrice sableuse contenant des cailloux et des blocs, définis comme des dépôts fluvioglaciers selon Héту et coll. (2020). Ces observations tendent à confirmer que, similairement aux constats de l'analyse des échantillons de forages de l'île de la Grande Entrée, les dépôts meubles chenalisés sont relativement hétérogènes.



**Figure 5.20 : Photo de dépôts meubles. a) Sédiments organiques, île d'Entrée. b) Sédiments éoliens, plage de Sandy Hook, île du Havre Aubert. c) Dépôts de versant, île du Cap aux Meules. d) Sédiments glaciomarins non différenciés, île aux Loups. e) Sédiments glaciomarins littoraux et périlittoraux, île du Havre aux Maisons. f) Till mince, île du Cap aux Meules. Crédits photographiques : Audrey M. Rémillard**

### 5.1.2.2 *Épaisseur des dépôts meubles*

L'estimation de l'épaisseur des sédiments reposant sur le socle rocheux est présentée, pour les îles principales, à la Carte 19 : Épaisseur des dépôts meubles, en annexe électronique, et à la Figure 5.21, sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m. L'estimation a été réalisée par interpolation des observations de profondeur au roc contenues de la base de données hydrogéologiques, tel que recommandé par un protocole pour les PACES (Benoit et coll., 2012). La méthodologie employée est détaillée à l'Annexe 9. Les observations ayant servi à l'interpolation sont localisées sur la Carte 19 et la Figure 5.21 afin de juger de la fiabilité de l'estimation d'un secteur qui dépend directement de la densité des observations dans ce secteur.

Les observations d'épaisseurs des dépôts meubles issues des descriptions stratigraphiques des forages, incluant les affleurements, ont été validées en tenant compte d'une série de critères comme la cohérence de la localisation et de la profondeur, les différences par rapport aux observations voisines et la fiabilité de la source. Des points de contrôle ont été ajoutés dans des secteurs où la densité des observations était insuffisante pour réaliser une interpolation comblant l'ensemble du territoire, ou pour améliorer le résultat de l'estimation.

L'interpolation par krigeage ordinaire, avec validation croisée et étude des résidus, n'a pu être possible que pour l'île de la Grande Entrée, qui possède une densité d'observations beaucoup plus grande que les autres, compte tenu de l'ajout de nombreux points de contrôle le long des profils de résistivité électrique (Section 4.1.3). Pour les autres îles, la méthode d'interpolation par pondération inverse à la distance a été employée. Dans les deux cas, de nombreux tests ont été effectués, afin d'ajuster au mieux les paramètres d'interpolation (ex. : pondération par rapport à la distance, nombre de points de recherche, distance du rayon de recherche, anisotropie) pour obtenir un résultat le plus réaliste possible.

À l'exception de la vallée glaciaire de l'île de la Grande Entrée, on retrouve en général une fine couverture de dépôts meubles aux îles de la Madeleine, de moins de 5 m d'épaisseur, sur 95 % du territoire. Plus du quart du territoire d'étude présente une épaisseur nulle, la moitié une épaisseur de moins de 1 m et le trois quarts une épaisseur d'à peine 2 m (Tableau 5.1). Quelques endroits montrent une épaisseur de dépôts meubles un peu plus élevé, de l'ordre de 10 à 15 m, soit dans le secteur du port de Grosse-Île, quelques zones très localisées dans les secteurs de Cap-aux-Meules, l'Étang-du-Nord et Fatima, et le secteur à l'ouest du Bassin sur l'île du Havre Aubert.

L'épaisseur des dépôts meubles varie d'environ 0 à 15 m sur la Grosse Île et l'île du Cap aux Meules et l'île du Havre Aubert, avec des moyennes respectives de 2,4, 1,1 et 0,6 m (Tableau 5.2). La couverture de sédiments est encore plus limitée sur les îles aux Loups, du Havre aux Maisons et d'Entrée, avec des valeurs maximales respectives de 2,1, 7,6 et 6,1 m, et des moyennes oscillant entre seulement 0,2 et 0,3 m.

De nouvelles limites de la vallée glaciaire enfouie de l'île de la Grande-Entrée ont été tracées en considérant une épaisseur minimale de 5 m du résultat de l'interpolation et en excluant les polygones de la roche en place de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18). Selon les observations stratigraphiques de la base de données hydrogéologiques, les interprétations des profils TRE de Comte (2008) par Yrro et coll. (2020) (Section 4.1.3) et le résultat de l'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles, la position de la vallée serait plus près de la bordure sud-est de l'île et ses limites seraient plus irrégulières que ce qui est supposé par la carte géologique (Carte 16). Elle serait aussi un

peu plus large, de 500 à 700 m. À défaut d'observations suffisantes, la localisation et la profondeur de la vallée demeurent inconnues à son extrémité nord-est. Plusieurs auteurs suggèrent que la vallée pourrait s'étendre vers la mer (Brisebois, 1972; Groupe Madelin'Eau, 2009; Yrro et coll., 2020), ce qui pourrait être appuyé par l'extension de l'unité des sédiments littoraux et pré-littoraux glacio-marins de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18). Toutefois, ceci demeure une hypothèse non validée par des observations.

La vallée de dépôts glaciaires de l'île de la Grande-Entrée fait en moyenne 35 m de profondeur, et atteint près de 100 m en son centre. La moitié de la vallée dépasse 35 m de profondeur. Ailleurs sur cette île, on retrouve une mince couche de dépôts meubles, semblable aux autres îles.

**Tableau 5.1 : Distribution des épaisseurs des dépôts meubles**

Quantile (%)	Épaisseur (m)
0	0
25	0
50	0,7
75	2,3
100	98,0

**Tableau 5.2 : Statistiques des épaisseurs de dépôts meubles, en mètre, par île**

Île	Min	Max	Moyenne	Écart-type
Grande Entrée	0,0	98,0	15,5	20,1
Grosse Île	0,0	13,7	2,4	2,1
aux Loups	0,0	2,1	0,2	0,4
Havre aux Maisons	0,0	7,6	0,3	0,7
Cap aux Meules	0,0	15,2	1,1	1,3
Havre Aubert	0,0	15,5	0,6	1,7
d'Entrée	0,0	6,1	0,2	0,4
<b>Îles de la Madeleine</b>	<b>0,0</b>	<b>98,0</b>	<b>1,7</b>	<b>6,5</b>

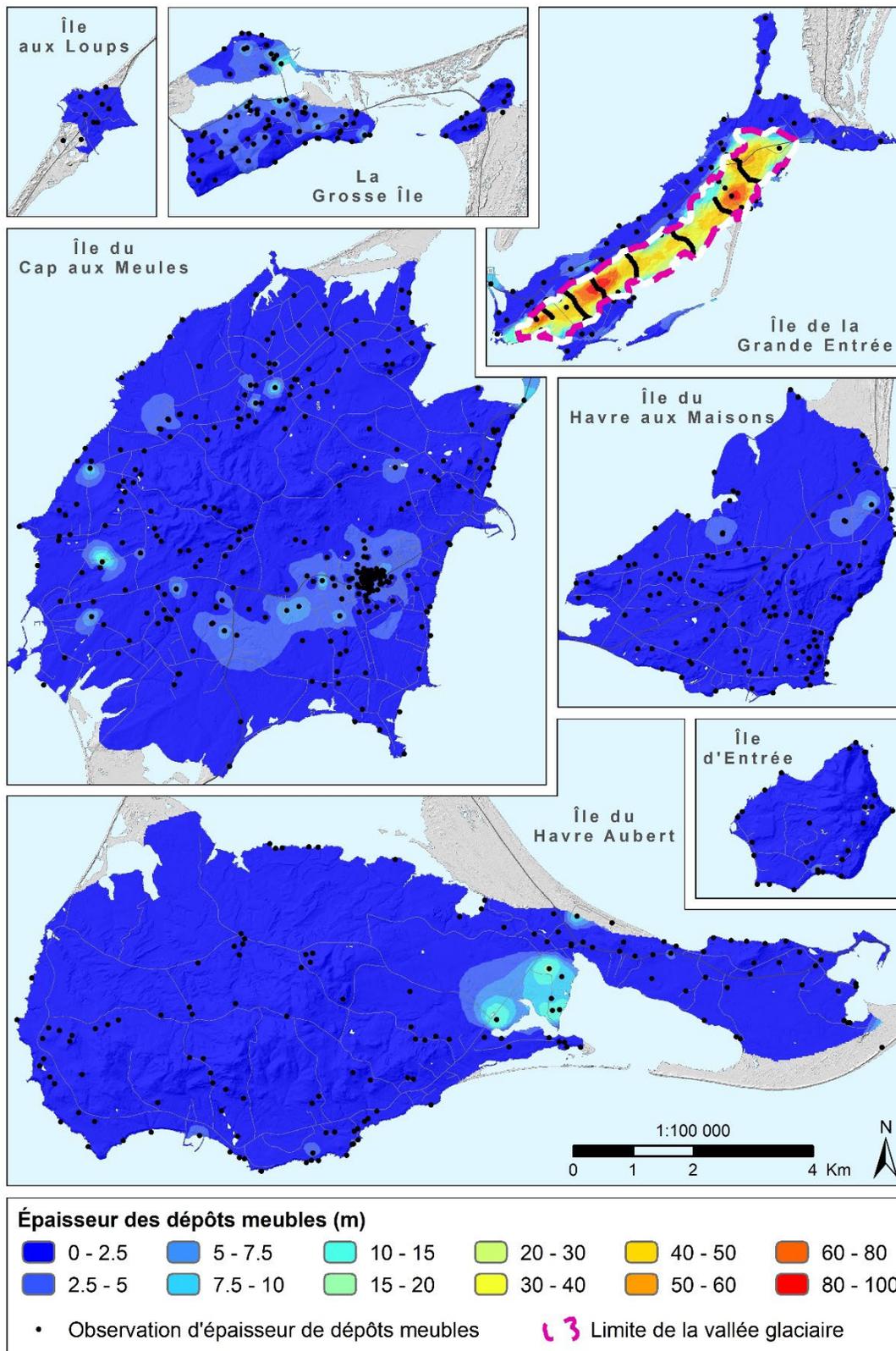
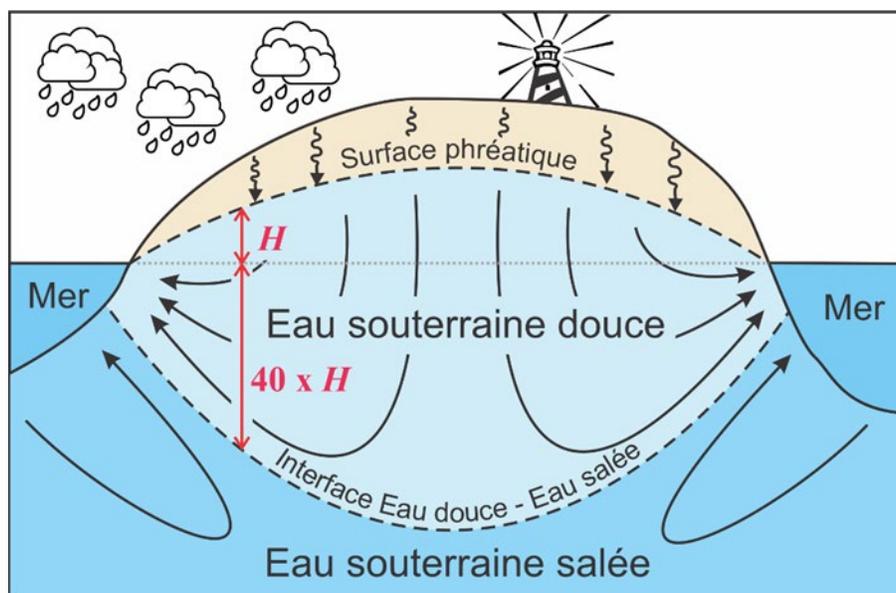


Figure 5.21 : Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles

## 5.2 Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique des îles de la Madeleine est intimement lié à la présence de la mer. L'infiltration des précipitations dans le sol alimente une nappe d'eau douce souterraine qui flotte, par contraste de densité, sur des eaux souterraines salées alimentées par la mer. Étant donné la forme de la nappe d'eau douce (Figure 5.22), celle-ci est parfois désignée sous le terme de lentille d'eau douce. Une approximation réaliste de la profondeur de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut être effectuée à l'aide de la relation de Ghyben-Herzberg si on connaît l'élévation de la nappe phréatique (voir Section 5.2.1.1 pour plus de détails). Cette relation indique que la profondeur de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée par rapport au niveau moyen de la mer correspond à environ 40 fois l'élévation de la nappe phréatique par rapport à ce niveau de référence (Figure 5.22).



**Figure 5.22 : Contexte hydrogéologique simplifié des îles de la Madeleine. La nappe d'eau douce y apparaît sous la forme d'une lentille**

La Figure 5.22 montre les directions d'écoulement de l'eau souterraine en profondeur à l'aide d'une coupe verticale. L'eau qui s'infiltrate et qui recharge la nappe s'écoule en profondeur et fait résurgence dans la mer. Le temps de résidence de l'eau souterraine dans l'aquifère est proportionnel à la longueur des flèches. Bien que cette figure soit schématique, elle illustre que les eaux souterraines douces et salées se mélangent peu. Elles ont plutôt tendance à s'écouler parallèlement vers la mer.

### 5.2.1 Interface eau douce – eau salée

L'interface entre l'eau douce et l'eau salée n'est pas nettement marquée, mais est plutôt constituée d'une zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée. Les profils de conductivité électrique réalisés dans les puits d'observation du RSESQ, présentés à la Figure 5.23, ont permis de documenter la zone de mélange. Ces profils montrent que la zone de mélange est assez étroite et varie environ de 4 à 7 m pour les puits de l'île de la Grande Entrée, et est de 16 m pour le puits EDN01 situé sur l'île du Cap aux

Meules. Une zone de mélange étroite signifie que le mécanisme de transport des solides dissous par advection est plus important que le transport par diffusion des chlorures provenant de la zone d'eau salée. Cela peut être expliqué par des vitesses d'écoulement de l'eau souterraine importantes en raison de conductivité hydraulique élevée des aquifères.

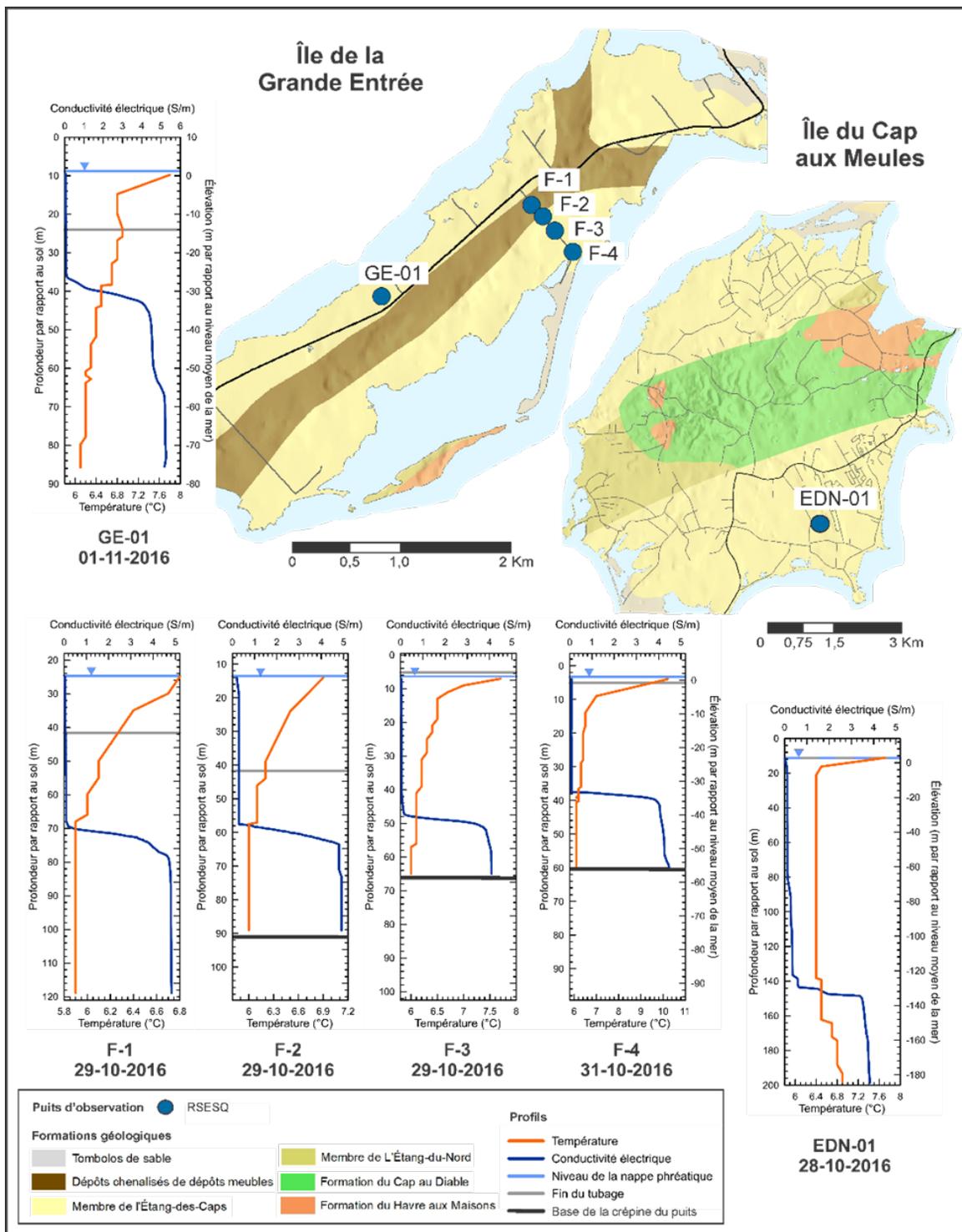
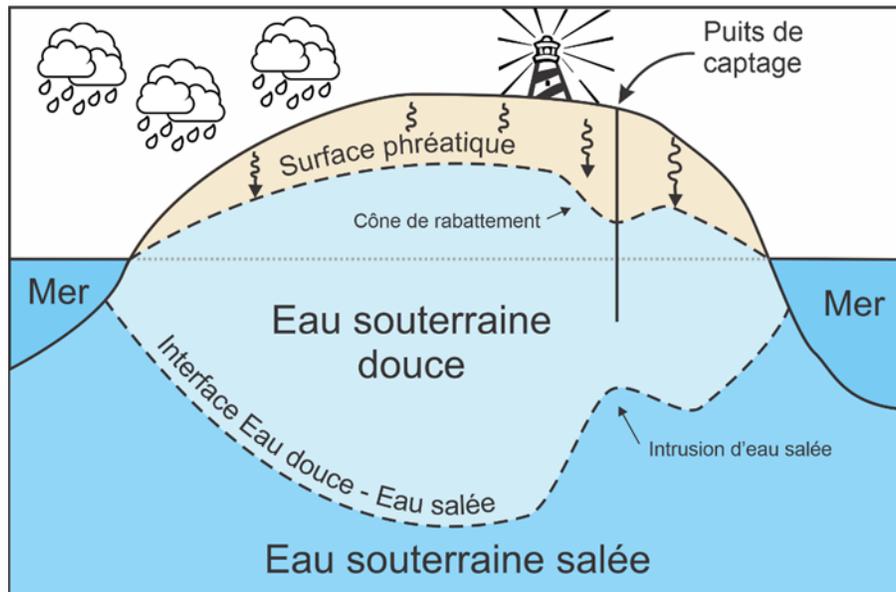


Figure 5.23 : Profils de conductivité électrique

Une des implications importantes associées à la relation de Ghyben-Herzberg est que si le niveau de la surface libre est modifié, un ajustement de la profondeur de l'interface va se produire (Figure 5.24). Ainsi, si un puits de captage cause un rabattement de la surface libre de 1 m, l'interface remontera de 40 m. La remontée n'est pas instantanée et pourrait nécessiter plusieurs années – cela dépend des propriétés hydrauliques de l'aquifère. Ainsi, si le pompage cause un rabattement important, la remontée de l'interface pourrait à terme causer une intrusion d'eau salée dans le puits.



**Figure 5.24 : Schéma illustrant l'intrusion d'eau salée associée au rabattement de la nappe phréatique dû au pompage dans un puits de captage. À noter que le schéma n'est pas à l'échelle et que d'après la relation de Ghyben-Herzberg, la remontée de l'eau salée est de 40 fois le rabattement**

L'élévation de l'interface eau douce – eau salée étant directement corrélée au niveau de la nappe, tout phénomène ayant une influence sur la piézométrie impactera nécessairement la position de l'interface. La recharge des nappes et la variation du niveau marin sont parmi les phénomènes qui affectent le niveau de la nappe phréatique. Compte tenu qu'ils peuvent être affectés par les changements climatiques, ils pourraient avoir un impact sur la position de l'interface.

Conceptuellement, une diminution de la recharge abaissera le niveau de la nappe et entraînera une remontée de l'interface eau douce – eau salée, amoindissant de ce fait l'épaisseur de la lentille d'eau douce ainsi que le volume d'eau douce disponible. L'inverse est aussi valable : une augmentation de la recharge s'accompagnera d'un accroissement du volume d'eau douce souterraine disponible. Une augmentation du niveau de la mer quant à elle provoquera une remontée de l'interface eau douce – eau salée accompagnée d'une hausse du niveau de la nappe (Figure 5.25).

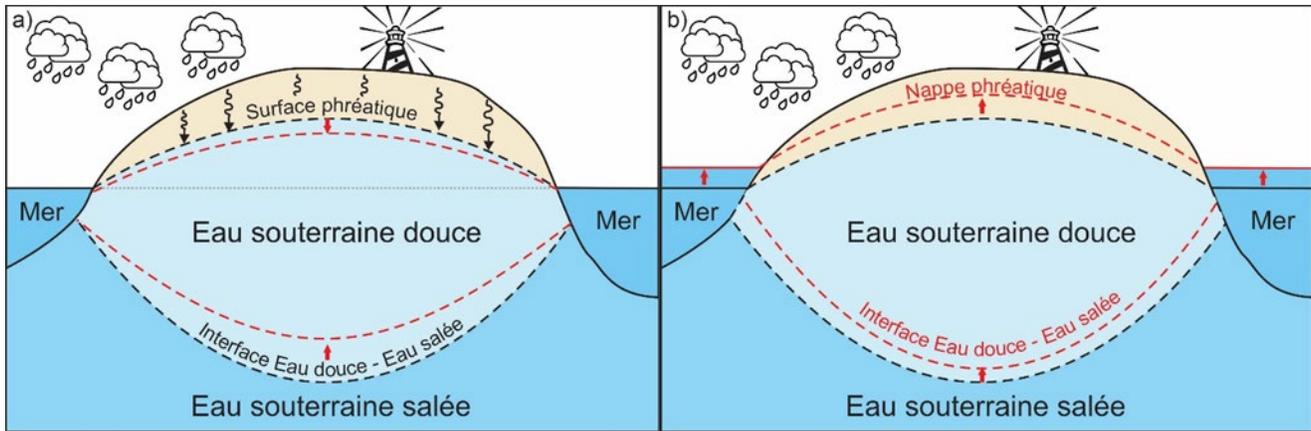


Figure 5.25 : Schéma illustrant a) l'effet de la diminution de la recharge; et b) l'effet de l'augmentation du niveau de la mer sur la lentille d'eau douce

### 5.2.1.1 Calcul théorique de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée

La profondeur de l'interface entre deux fluides immiscibles et statiques de densité différente peut être évaluée lorsque leur densité est connue. Dans le cas de l'eau douce et l'eau salée, cette relation, dite de Ghyben-Herzberg, est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \quad (1)$$

où  $z$  est la profondeur de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée par rapport au niveau de la mer,  $\rho_w$  est la densité de l'eau douce,  $\rho_s$  est la densité de l'eau salée et  $h$  l'élévation de la surface libre par rapport au niveau de la mer.

Si on considère une densité d'eau salée de 1,025 et de 1,0 pour l'eau douce, le rapport  $\rho_w/(\rho_s-\rho_w)$  correspond à 40, une valeur couramment utilisée dans les études d'intrusion d'eau salée en absence de mesures directes de densité. Aux îles de la Madeleine, Lemieux et coll. (2017) ont évalué la densité de l'eau d'échantillons provenant des sections d'eau douce et d'eau salée des puits F-2, F-3 et F-4 du RSESQ (localisation à la Figure 5.23). Celle-ci a été évaluée à partir des résultats de l'analyse de la composition chimique de l'eau souterraine prélevée à différentes profondeurs dans les puits à l'aide d'une pompe à vessie. Pour ce faire, la masse de matière dissoute totale (MDT) est calculée pour chacun des échantillons. Elle est par la suite ajoutée à la masse volumique de l'eau distillée à 6°C, soit la température moyenne des eaux souterraines mesurée aux îles de la Madeleine pour ces puits. Selon Lide (1997), elle est de 999,943 g/L, donc une valeur de 1000 g/L a été utilisée. La densité est ensuite calculée en effectuant le rapport entre la masse volumique de l'eau distillée comprenant les MDT et la masse volumique de l'eau distillée (1000 g/L). Les résultats sont présentés au Tableau 5.3. Le rapport  $\rho_w/(\rho_s-\rho_w)$  varie entre 35,7 et 40,5.

**Tableau 5.3 : Matière dissoute totale (MDT) et densité de l'eau souterraine obtenues à partir des résultats d'analyse de la composition chimique de l'eau. Le rapport entre la densité de l'eau douce ( $\rho_w$ ) et la différence de densité entre l'eau salée ( $\rho_s$ ) et l'eau douce est également présenté**

Puits	Profondeur d'échantillonnage <sup>1</sup> (m)	Type d'eau	MDT (g/L)	Densité	$\rho_w/(\rho_s-\rho_w)$
EDN	42,25	Douce	0,52	$\rho_w = 1,0005$	-
F-1	46,00	Douce	0,39	$\rho_w = 1,0004$	-
	63,00	Douce	0,49	$\rho_w = 1,0005$	-
F-2	45,00	Douce	1,47	$\rho_w = 1,0015$	-
	55,00	Douce	1,48	$\rho_w = 1,0015$	-
	67,00	Salée	26,22	$\rho_s = 1,0262$	40,5
F-3	24,00	Douce	0,22	$\rho_w = 1,0002$	-
	36,00	Douce	0,22	$\rho_w = 1,0002$	-
	61,00	Salée	27,05	$\rho_s = 1,0271$	37,3
F-4	21,02	Douce	0,42	$\rho_w = 1,0004$	-
	31,02	Douce	0,42	$\rho_w = 1,0004$	-
	46,02	Salée	27,47	$\rho_s = 1,0275$	37,0
	56,02	Salée	28,47	$\rho_s = 1,0285$	35,7

<sup>1</sup> Par rapport au tubage de protection

Étant donné que le niveau de la mer aux îles de la Madeleine est différent du niveau moyen des mers (niveau géodésique) utilisé comme référence pour la mesure des niveaux d'eau et de la profondeur de la zone de mélange dans les puits (voir Section 2.3.8), une correction doit être apportée afin de les comparer. Ainsi, l'élévation de l'interface obtenue avec la relation de Ghyben-Herzberg peut également être obtenue par rapport au niveau géodésique ( $Z_{geo}$ ) à l'aide de l'équation suivante :

$$Z_{geo} = -\frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w}(h - 0,168) - 0,168 \quad (2)$$

où 0,168 m représente la différence entre le niveau de la mer aux îles de la Madeleine et le niveau moyen des mers en 2021. Avec la subsidence des îles et la remontée moyenne du niveau de la mer, cette valeur est appelée à changer avec le temps.

Il est important de noter que l'équation de Ghyben-Herzberg est valide pour des liquides immiscibles en conditions hydrostatiques, c'est-à-dire dans une situation où il n'y a pas d'écoulement de l'eau souterraine. Compte tenu de la faible épaisseur de la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée observée dans les puits du RSESQ, l'hypothèse des liquides immiscibles semble vérifiée en conditions naturelles aux îles de la Madeleine. Toutefois, ce n'est pas le cas à proximité des captages municipaux où la remontée de l'interface peut causer une dispersion importante. Aussi, l'hypothèse des conditions hydrostatiques ne peut être vérifiée, notamment près des côtes où il y a convergence des lignes d'écoulement de l'eau souterraine. Ainsi, cette équation peut être utile pour approximer la profondeur de l'interface, mais compte tenu de ces limitations et pour davantage de précision, la profondeur de l'interface doit être vérifiée à l'aide d'autres méthodes.

### 5.2.1.2 Biais dans la mesure de l'interface eau douce – eau salée dans les puits

Il a été rapporté dans la littérature que les puits d'observation avec une longue section crépinée peuvent introduire un biais dans la forme et la position de la zone de mélange en raison d'écoulement préférentiel dans le puits (ex. : Shalev et coll., 2009). Étant donné que les puits d'observation du RSESQ sont construits avec de longues sections ouvertes, notamment dans la zone d'eau salée, une étude spécifique a été réalisée afin d'évaluer ce biais (Croteau et coll., 2021). Cette analyse repose sur les observations réalisées depuis 2016 dans les puits du RSESQ et sur la modélisation numérique de l'écoulement et du transport de solutés pour une situation avec, et sans puits d'observation. Les simulations révèlent que le profil de charge hydraulique naturel est grandement affecté par la construction du puits (Figure 5.26a). Il en résulte un écoulement vertical dans le puits (Figure 5.26b) qui cause le déplacement de la zone de mélange vers la surface (Figure 5.26c). Le déplacement se produit rapidement après la construction du puits et peut atteindre plusieurs mètres (presque 10 m dans l'exemple de la Figure 5.26c). Aussi, cet écoulement fait en sorte que la concentration en chlorures dans la zone d'eau salée diminue progressivement avec le temps. Ainsi, une diminution d'environ 15 % de la salinité (ou conductivité électrique) de l'eau a été simulée sur une période de 5 ans, ce qui est compatible avec les observations effectuées depuis la construction des puits du RSESQ. Plus de détails concernant cette problématique sont donnés par Croteau et coll. (2021).

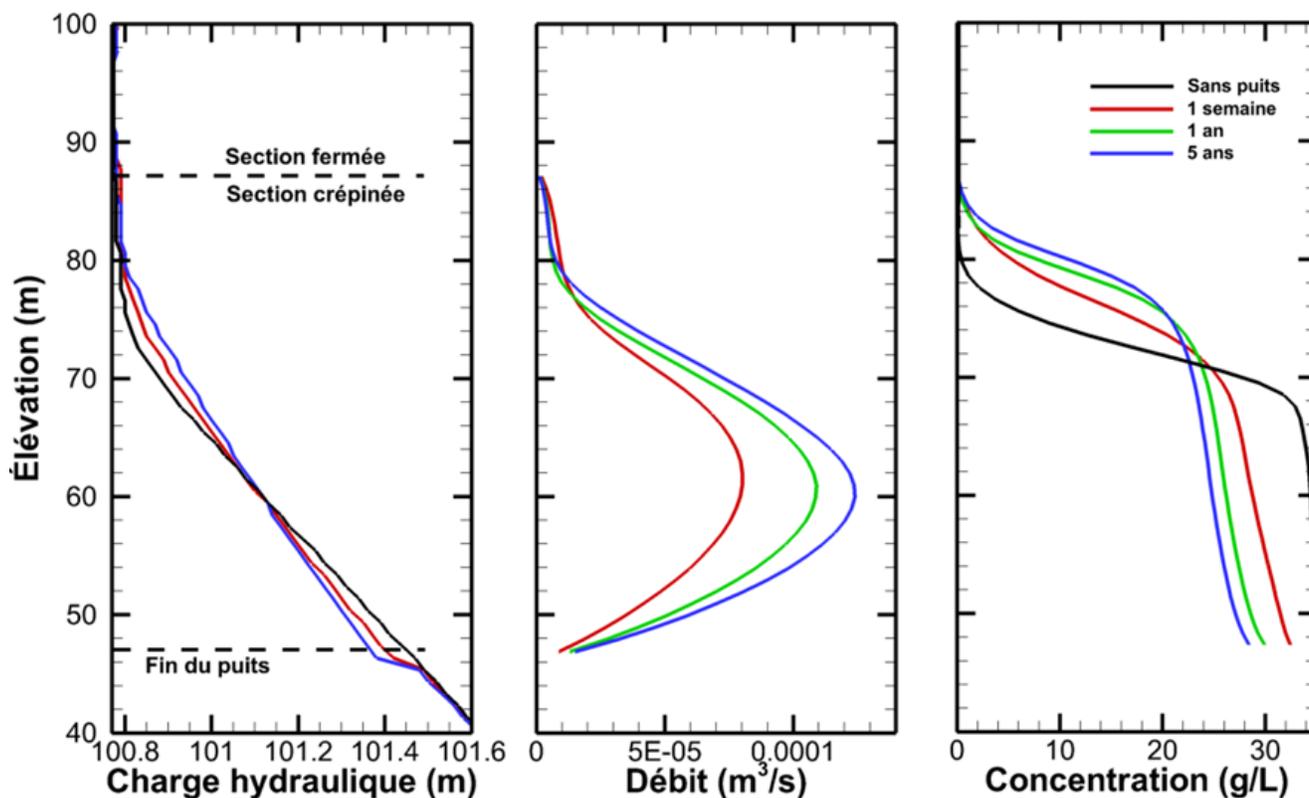


Figure 5.26 : Exemple de résultat de simulation numérique qui montre l'évolution du profil de charge hydraulique suivant la construction du puits, l'évolution du profil de débit dans le puits suivant sa construction (un débit positif indique un écoulement ascendant) et les profils de concentration en chlorures dans le puits à différents moments suivant sa construction

### **5.2.2 Origine de l'eau souterraine**

Tel qu'il a été mentionné dans la Section 5.1.2 (Géologie du Quaternaire), l'archipel a probablement été recouvert par les glaces lors de la dernière période glaciaire. Les recherches récentes suggèrent que les conditions sous-glaciaires favorisent un substrat à l'état non gelé en raison de la friction causée par l'écoulement des glaces à la base de la calotte glaciaire ainsi qu'à la chaleur fournie par le gradient géothermique. Ces conditions favorisent aussi la production d'eau de fonte à la base de la calotte glaciaire. Cette eau de fonte peut alors s'infiltrer dans les aquifères sous-jacents en raison de la pression exercée par le poids des glaces. L'infiltration sous-glaciaire est un phénomène bien documenté (ex. : Person et coll., 2007; Lemieux et coll., 2008) qui est d'autant plus important dans les roches sédimentaires poreuses et perméables, comme celles des îles de la Madeleine. Ainsi, lorsque la calotte glaciaire s'est retirée, il est probable que les unités géologiques de l'archipel contenaient de l'eau douce qui s'y était infiltrée lorsque les glaciers recouvraient l'archipel.

Suite au retrait des glaces, la mer a progressivement immergé le territoire que la calotte glaciaire recouvrait, mais sans submerger complètement les îles aux élévations dépassant le niveau relatif maximal de 40 m (Figure 5.17 de la Section 5.1.2). Ainsi, il est probable qu'une lentille d'eau douce ait existé pour ces îles aux sommets élevés, et ce, depuis la dernière glaciation. Toutefois, ailleurs sur l'archipel, l'invasion marine a pu immerger complètement certaines îles et causer un remplacement de l'eau douce d'origine sous-glaciaire par de l'eau salée.

Lors de l'émergence progressive de l'archipel, la lentille d'eau douce des îles aux sommets élevés s'est alors agrandie, à la fois latéralement et en profondeur. Sur les autres îles, une lentille d'eau douce s'est progressivement mise en place, lorsque l'eau de précipitation a lentement remplacé l'eau salée. Les lentilles d'eau douce ont atteint leur taille maximale il y a -10 ka, lorsque le niveau relatif de la mer était de -20 m par rapport au niveau actuel. Depuis, la remontée du niveau relatif de la mer a causé une diminution du volume des lentilles d'eau douce.

## 6 PRESSIONS SUR L'EAU SOUTERRAINE

Cette section présente un survol des pressions exercées sur la ressource en eau souterraine, tant sur sa quantité que sa qualité. À ce sujet, le rapport d'enquête et d'audience publique du BAPE (2013), portant sur les effets liés à l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière, constitue une source précieuse d'information. Les pressions liées aux changements climatiques sont aussi abordées par le BAPE (2013). L'analyse de vulnérabilité des sources en eau potable réalisée récemment par Tremblay et coll. (2022) est aussi d'intérêt, car elle a évalué les risques de contamination de l'eau potable associés aux activités humaines dans les aires d'alimentation des puits municipaux (voir Section 3.1.4) et dans leur entourage immédiat. Cependant, le présent portrait s'intéresse à la ressource en eau souterraine dans son ensemble, et pas seulement les eaux exploitées. De nombreuses autres activités humaines pouvant avoir un impact sur la quantité ou la qualité de la ressource se pratiquent ailleurs sur le territoire. Enfin, un atelier d'échange de connaissance a été réalisé le 6 juin 2018 avec 16 acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine, membres du comité de suivi élargi du projet (Section 1.4). Les activités réalisées lors de cet atelier sont présentées dans un cahier des résultats produit par le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES, 2019). L'inventaire des préoccupations des participants au regard de la protection et de gestion des eaux souterraines a été dressé. Celles-ci concernent :

- Les mines;
- La contamination à l'aéroport;
- Les carrières et sablières;
- Les anciens dépotoirs et sites contaminés;
- Les hydrocarbures;
- Les activités agricoles et l'aménagement du territoire;
- Les intrusions d'eau saline;
- La recharge et les recommandations associées;
- La surexploitation et la capacité de support de l'eau souterraine;
- La pérennité des puits, tant au niveau de la quantité que de la qualité de l'eau;
- La qualité de l'eau souterraine;
- La sensibilisation auprès du grand public et les puits privés;
- Le lien entre l'eau de surface et l'eau souterraine;
- Les cordons dunaires;
- Le déboisement et le reboisement;
- L'érosion côtière;
- L'évaluation des impacts des activités humaines.

Les trois préoccupations jugées prioritaires par les participants sont :

- La surexploitation et la capacité de support de l'eau souterraine;
- La pérennité des puits, tant au niveau de la quantité que de la qualité de l'eau;
- L'évaluation des impacts des activités humaines.

Le risque d'intrusion d'eau salée dans le réservoir d'eau exploitable constitué par la lentille d'eau douce recoupe les deux premières préoccupations prioritaires ci-dessus. L'exploitation de l'eau souterraine par des puits, si réalisée de façon imprudente, pourrait mener à une intrusion d'eau salée par la base de l'aquifère. Les changements climatiques, pouvant avoir pour conséquence de réduire la disponibilité de la ressource, concernent également ces deux préoccupations. Au sujet de la troisième préoccupation

jugée prioritaire, il est établi que la vulnérabilité de la ressource face à une contamination pouvant provenir de la surface est élevée (Section 8.6). L'absence de couche imperméable au-dessus des aquifères fait en sorte que l'eau, et les contaminants mobilisés, peuvent atteindre facilement et rapidement la nappe phréatique. Ainsi, les activités humaines pratiquées sur le territoire pourraient altérer la qualité de l'eau souterraine. Les pressions issues de ces activités humaines qui pèsent sur la ressource, de même que celles provoquées par le risque de salinisation des puits et les changements climatiques, sont abordées dans les sous-sections qui suivent. Celles-ci couvrent la vaste majorité des préoccupations inventoriées lors de l'atelier d'échange discuté précédemment.

## 6.1 L'intrusion d'eau salée dans des puits de captage

Une des principales pressions exercées sur la ressource en eau souterraine concerne l'intrusion d'eau salée dans les puits de captage. L'importance de cet enjeu réside dans le fait que lorsqu'un puits de captage est salinisé, plusieurs décennies peuvent être nécessaires avant que l'intrusion ne se résorbe et que le puits puisse être utilisé de nouveau.

Un cas connu de contamination d'intrusion d'eau salée dans des puits de captage a été documenté par le Groupe Madelin'Eau (2004) dans le secteur de la pointe au sud-ouest de l'île de la Grande Entrée. Deux puits anciennement utilisés par l'usine de transformation de produits de la mer Madelimer, et ayant aussi alimenté quelques résidences et commerces, pompaient de l'eau saumâtre due à des remontées d'eau saline sous les puits. Il s'agit des puits John-Fred et à Mario (ce dernier aussi nommé Madelimer ou Pealy), localisés à la Figure 6.1 . Ces puits ont été abandonnés depuis la mise en service d'un réseau d'alimentation municipal en 2013 et le raccordement de l'usine en 2015. Des travaux de géophysique réalisés en 2003 par le Groupe Madelin'Eau montrent que la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée formaient de larges dômes sous les puits, ce qui reflétait une remontée du front salin allant jusqu'à 55 m de profondeur sous le puits John-Fred et jusqu'à 40 m sous le puits à Mario. Il est établi que le secteur est ainsi vulnérable aux intrusions d'eau salée, car l'interface eau douce – eau salée est située à de très faibles profondeurs.

De l'eau légèrement salée a également été pompée au puits GE-09-05B sur l'île de la Grande Entrée (Figure 6.1) peu de temps après sa mise en service en 2013. Ce dernier n'est situé qu'à seulement 150 m du puits John-Fred où la conductivité électrique de l'eau a atteint 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à la même période. La diminution du débit de pompage du puits GE-09-05B et la fermeture définitive du puits John-Fred semblent avoir été bénéfiques, puisque les responsables municipaux de l'approvisionnement en eau potable n'ont depuis constaté aucun problème.

Des simulations, par modélisation numérique, de la remontée de l'interface eau douce – eau salée dans les puits d'alimentation de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, selon les débits de pompage actuels, ont été réalisées dans le cadre de cette étude et sont présentées à la Section 9.1.1.

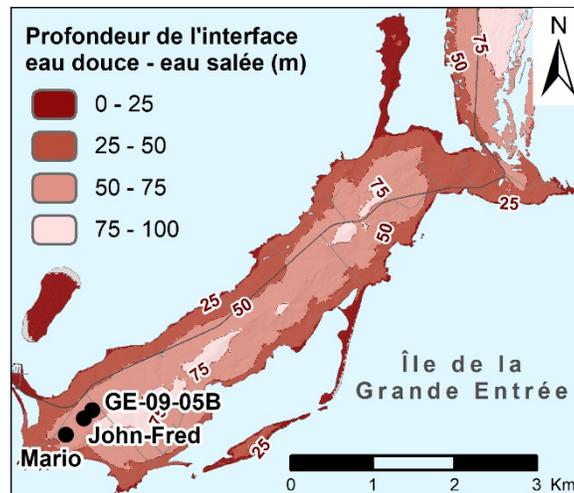


Figure 6.1 : Localisation des puits John-Fred, à Mario et GE-09-05B, ayant pompé de l'eau salée, sur l'île de la Grande-Entrée

## 6.2 Les activités humaines menaçantes

### 6.2.1 Le transport et l'entreposage des hydrocarbures

#### 6.2.1.1 Réservoirs domestiques de mazout

Pour diminuer la dépendance énergétique à la centrale thermique, Hydro-Québec verse des subventions importantes favorisant l'implantation de systèmes autonomes de chauffage aux hydrocarbures, dont le rendement énergétique est doublé comparativement à la centrale. Il est estimé qu'environ 50 % des résidences aux îles de la Madeleine possèdent un tel système de chauffage (Tremblay et coll., 2022). Hydro-Québec répertorie l'utilisation d'un chauffage à l'huile pour près de ses 3 200 clients (BAPE, 2013). Bien que depuis 2010 les nouveaux réservoirs installés comprennent un double fond, et depuis 2012 les systèmes au mazout sont graduellement remplacés pour des systèmes au propane, des fuites des anciens ou actuels réservoirs de mazouts sont tout de même possibles et ont déjà été observées. Le risque de déversement d'hydrocarbures lors du remplissage des réservoirs est aussi important. On dénombre d'ailleurs au moins une trentaine de déversements avérés depuis les années 1990 (Tremblay et coll., 2022), et 32 signalements ont été rapportés à Urgence-Environnement entre 2000 et 2012 (BAPE, 2013).

#### 6.2.1.2 Centrales thermiques d'Hydro-Québec

La centrale thermique de Cap-aux-Meules, d'une puissance maximale de 67 000 kW, a consommé environ 40,5 millions de litres de carburant en 2012. On retrouve sur le site trois réservoirs de mazout et diesel, qui ont une capacité totale de 21 millions de litres. Une contamination de la nappe a été constatée en 1989 aux abords de la centrale. Le déversement a été évalué à 40 000 L (BAPE, 2013). D'importants travaux de décontamination ont résulté au retrait de 136 000 m<sup>3</sup> de sols contaminés, et un système de confinement hydraulique a été mis en place jusqu'en 2001. Depuis, un programme de suivi de la contamination résiduelle est assuré (Martel et coll., 2015). À noter que deux puits municipaux en eau potable se situent à quelques centaines de mètres en aval du site de la centrale thermique.

Un pipeline de 3 km relie la centrale thermique depuis le port de Cap-aux-Meules. Une fuite du pipeline a provoqué, le 11 septembre 2014, un déversement de 100 000 L de diesel dans les eaux du port (Radio-Canada, 2016). Les eaux souterraines ne semblent pas avoir été affectées.

Une autre centrale thermique au diesel, d'une puissance de 1 200 kW, alimente en électricité l'île d'Entrée. Selon le Répertoire des terrains contaminés du MELCC, une contamination en hydrocarbures pétroliers C10 à C50 y est associée.

### **6.2.1.3 Le transport maritime**

Bien que minimisé pour les eaux souterraines, le transport maritime des hydrocarbures constitue un risque majeur de marée noire pour les écosystèmes aquatiques et côtiers. Les îles de la Madeleine étant dépendantes aux hydrocarbures pour leur production d'énergie, des livraisons régulières de diesel sont effectuées pour alimenter la centrale thermique de Cap-aux-Meules. De plus, le Golfe du Saint-Laurent constitue la porte d'entrée pour l'importante voie maritime du Saint-Laurent, où plus de 10 millions de tonnes de vrac liquide, composé surtout de pétrole et de ses produits dérivés, ont transité en 2020 (La Presse, 2021). Enfin, l'exploration et l'exploitation du gisement Old Harry situé à environ 80 km au nord-est de l'archipel, bien qu'abandonné pour le moment (Radio-Canada, 2020), pourraient augmenter le transport d'hydrocarbures dans le golfe.

Le risque de marée noire est bien réel, tel que montré par le cas du Irving Whale en 1970. Cette barge, transportant 4 300 tonnes de mazout, a sombré dans le Golfe du Saint-Laurent, contaminant ainsi des plages du front ouest des îles de la Madeleine. Environ 200 000 sacs contenant un mélange de mazout, biphényles polychlorés (BPC) et de sable ont été enfouis dans les dunes au nord de l'île aux Loups (BAPE, 2013). L'érosion côtière libère occasionnellement des sacs, ce qui cause un risque de contamination dans les dunes de sable, mais à l'intérieur du lieu d'intervention par la Garde côtière du Canada qui assure l'élimination des matériaux contaminés, lorsque découverts. Aucun programme de restauration n'est mis en place étant donné les difficultés de détections des sacs contaminés, la fragilité des milieux dunaires et les risques d'érosion.

### **6.2.1.4 Les anciens puits d'exploration gazière et salifère**

Entre 1972 et 1974, la Société québécoise d'exploration minière (SOQUEM) a effectué neuf forages d'exploration gazière et salifère. Il est rapporté qu'au moins 12 000 L d'hydrocarbures auraient alors été employés comme fluide de forage (Le Devoir, 2013). Des évidences indiquant une migration de diesel vers la surface auraient été observées à l'été 2013 sur la plage de Sandy Hook, sur l'île du Havre Aubert (Le Devoir, 2013). Plus récemment, l'entreprise Corridor Resources a réalisé un forage d'exploration gazière de 686 m de profondeur en 1999 (Le Devoir, 2013). Selon l'Association madelinienne pour la sécurité énergétique et environnementale, on dénombrait aussi 85 sites d'anciens sondages miniers sur l'archipel (Radio-Canada, 2018). Les détails techniques sur cette problématique n'étant pas disponibles dans de la documentation publique, il n'est pas possible de détailler davantage cette menace.

### **6.2.1.5 Mines Seleine**

Une fuite de diesel a aussi été constatée au site des Mines Seleine, situé sur le cordon dunaire au sud de la Grosse Île. Les travaux de réhabilitation n'ont pu être complétés, car des sols contaminés s'étendent sous les bâtiments en place (BAPE, 2013).

### **6.2.1.6 Autres terrains contaminés**

En excluant les cas de contamination majeurs aux hydrocarbures relatés ci-dessus, on recense près d'une dizaine d'autres sites problématiques dans le Répertoire des terrains contaminés du MELCC. Ils sont répartis sur la plupart des îles principales. Toutes ces contaminations concernent des hydrocarbures, comme des hydrocarbures pétroliers C10 à C50, des hydrocarbures légers, des hydrocarbures aromatiques monocycliques et polycycliques, des biphényles polychlorés (BPC), du benzène, de l'éthylbenzène, du naphthalène, du phénanthrène, du toluène, des xylènes et des huiles usées. Ces contaminations sont toutes liées à des stations-service ou à des activités d'entreposage de produits pétroliers, à l'exception d'un écrasement d'avion. La plupart de ces terrains ont été réhabilités ou sont en cours de réhabilitation. D'autres terrains contaminés non répertoriés sont aussi possibles.

L'inventaire des sites contaminés fédéraux contient 95 sites dans l'archipel. Ce nombre est élevé, car contrairement au répertoire québécois, l'inventaire fédéral contient aussi des sites soupçonnés d'être contaminés. Les sites dont l'analyse a conclu qu'aucune mesure de réhabilitation n'est nécessaire sont majoritaires. En plus des hydrocarbures, on retrouve parfois dans les sols ou les eaux souterraines à ces sites des contaminants de types métaux, métalloïdes et organométalliques.

## **6.2.2 La gestion des eaux usées**

### **6.2.2.1 Installations septiques autonomes**

La principale source de contamination microbiologique des eaux souterraines provient des eaux usées, issues d'installations septiques autonomes déficientes ou mal entretenues (BAPE, 2013). Certains produits d'entretien ménager et produits chimiques à usages domestiques peuvent aussi réduire l'efficacité du traitement d'installations en parfait état. Un inventaire exhaustif sur l'état des installations septiques autonomes sous juridiction municipale a été réalisé en 2015 et 2016 pour l'ensemble de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016). Il existe près d'une quarantaine d'autres bâtiments avec installation septique autonome sous juridiction du MELCC, c'est-à-dire ayant plus de six chambres à coucher ou dont le débit journalier d'eaux usées dépasse 3 240 L. Sur les 4 500 bâtiments répertoriés sous juridiction municipale, 2 899 (65 %) des installations septiques étaient conformes, 1 331 (29 %) non conformes et 270 (6 %) à statut non déterminé. Le risque de contamination par des microorganismes, mais aussi d'autres contaminants comme les nitrites-nitrates et les produits pharmaceutiques est donc important.

La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a déjà connu des épisodes de contamination de ses puits municipaux liés à des installations septiques (BAPE, 2013). Des réseaux d'égout sanitaires ont été implantés à partir de 1990 dans les secteurs des puits municipaux aux îles du Havre aux Maisons et du Cap aux Meules afin de réduire cette problématique.

### **6.2.2.2 Systèmes d'assainissement collectifs**

Il existe actuellement cinq systèmes d'assainissement collectifs municipaux aux îles de la Madeleine, soit trois sur l'île du Cap aux Meules, et un sur les îles du Havre aux Maisons et du Havre Aubert. Ceux-ci desservent tout près de 1 500 bâtiments selon l'inventaire de la municipalité de 2015 et 2016 (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016). En moyenne, un volume d'environ un million de mètres cubes d'eaux usées est généré par année (BAPE, 2013). Les réseaux d'égout peuvent constituer un risque de contamination des eaux souterraines par des fuites, surtout s'ils sont plus âgés, ou des bris.

Outre les microorganismes, les eaux usées sont aussi des sources de contamination en nitrites et nitrates.

Les trois systèmes d'assainissement municipaux de l'île du Cap aux Meules sont constitués au total de 56 km d'égout sanitaire et couvrent l'ensemble de Cap-aux-Meules ainsi que les secteurs les plus développés de Fatima et de l'Étang-du-Nord. Ils datent de 1965, avec des ajouts périodiques jusqu'en 2011. À l'aide d'une dizaine de stations de pompage, les eaux usées sont acheminées jusqu'à trois sites de traitement des eaux usées constitués de bassins aérés, où elles sont traitées avant d'être renvoyées à la mer via trois émissaires distincts.

Le système d'assainissement de l'île du Havre aux Maisons est constitué d'un réseau d'égout sanitaire de 12,5 km, datant de 1996 à 2020. Il couvre principalement le secteur des puits d'alimentation en eau potable du secteur d'Arsenault jusqu'à celui de Pointe-Basse plus au sud-ouest. L'eau est acheminée grâce à quatre stations de pompage jusqu'à un site de traitement des eaux usées constitué de bassins aérés et situé à l'extrémité nord-est du réseau.

Un petit réseau de 6 km dessert l'île du Havre Aubert entre les secteurs du Portage-du-Cap et La Grave. Les conduites ont été installées entre 1997 et 2006. Ce système de traitement est également composé de bassins aérés d'épuration ainsi que d'une station de pompage.

### **6.2.3 La gestion des matières résiduelles**

Avant 1994, les matières résiduelles étaient enfouies dans divers dépotoirs, pour la plupart municipaux, localisés sur chacune des îles principales de l'archipel. On dénombre 13 de ces anciens dépotoirs, tous fermés entre la fin des années 60 et 1996. Du nord au sud, il y en avait deux sur l'île de la Grande Entrée, deux sur celle de la Grosse Île, deux sur les cordons dunaires entre les îles aux Loups et du Havre aux Maisons, un sur cette dernière, trois sur celles du Cap aux Meules, deux sur celle du Havre Aubert et un sur l'île d'Entrée. Les sites d'enfouissement parmi ceux-ci qui n'ont jamais été nettoyés et pour lesquels aucun suivi des eaux souterraines n'est effectué constitueraient la menace principale pour l'eau souterraine liée aux matières résiduelles selon le BAPE (2013).

Depuis 1994, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine exploite un centre de gestion des matières résiduelles, situé sur le cordon dunaire au nord de l'île du Havre aux Maisons, où tous les déchets de l'archipel sont acheminés. Jusqu'en 2010, les matières non recyclables et non compostables étaient éliminées grâce à un incinérateur. Ce dernier a toutefois failli à plusieurs reprises, avec des bris d'équipement fréquents et majeurs, en plus de subir une corrosion prématurée due aux rigueurs du climat maritime (BAPE, 2006). Ces bris ont entraîné des accumulations de déchets au centre de gestion des matières résiduelle, dont les terrains ont dû être remis en état et un suivi mis en place, car ils représentaient un risque pour l'eau souterraine selon le MELCC. Les résidus d'incinération et les anciens dépotoirs ne feraient par contre l'objet d'aucun suivi.

Suite notamment à un rapport d'enquête et d'audience publique du BAPE (2006) portant sur un projet d'enfouissement d'un lieu d'enfouissement technique aux îles de la Madeleine, il a été décidé, depuis 2010, d'acheminer les matières résiduelles et recyclables de l'archipel sur le continent au lieu d'enfouissement technique de Saint-Rosaire et au centre de tri de Victoriaville. Les matières compostables sont toujours traitées sur place.

## **6.2.4 L'utilisation des sels de déglacage**

Environ 2 000 t/an de sels de voirie sont utilisées par le MTQ pour l'entretien d'un réseau routier de 107 km (route 199 et routes collectrices), ce qui correspond environ à 20 t/km/an (Tremblay et coll., 2022). Pour le réseau routier municipal de 235 km, les sels de déglacage ne sont employés qu'aux courbes dangereuses et aux intersections, sauf lors d'épisodes de verglas. L'application des sels oscille entre 450 et 550 t/an, selon les années, ce qui équivaut environ à 2 t/km/an (Tremblay et coll., 2022).

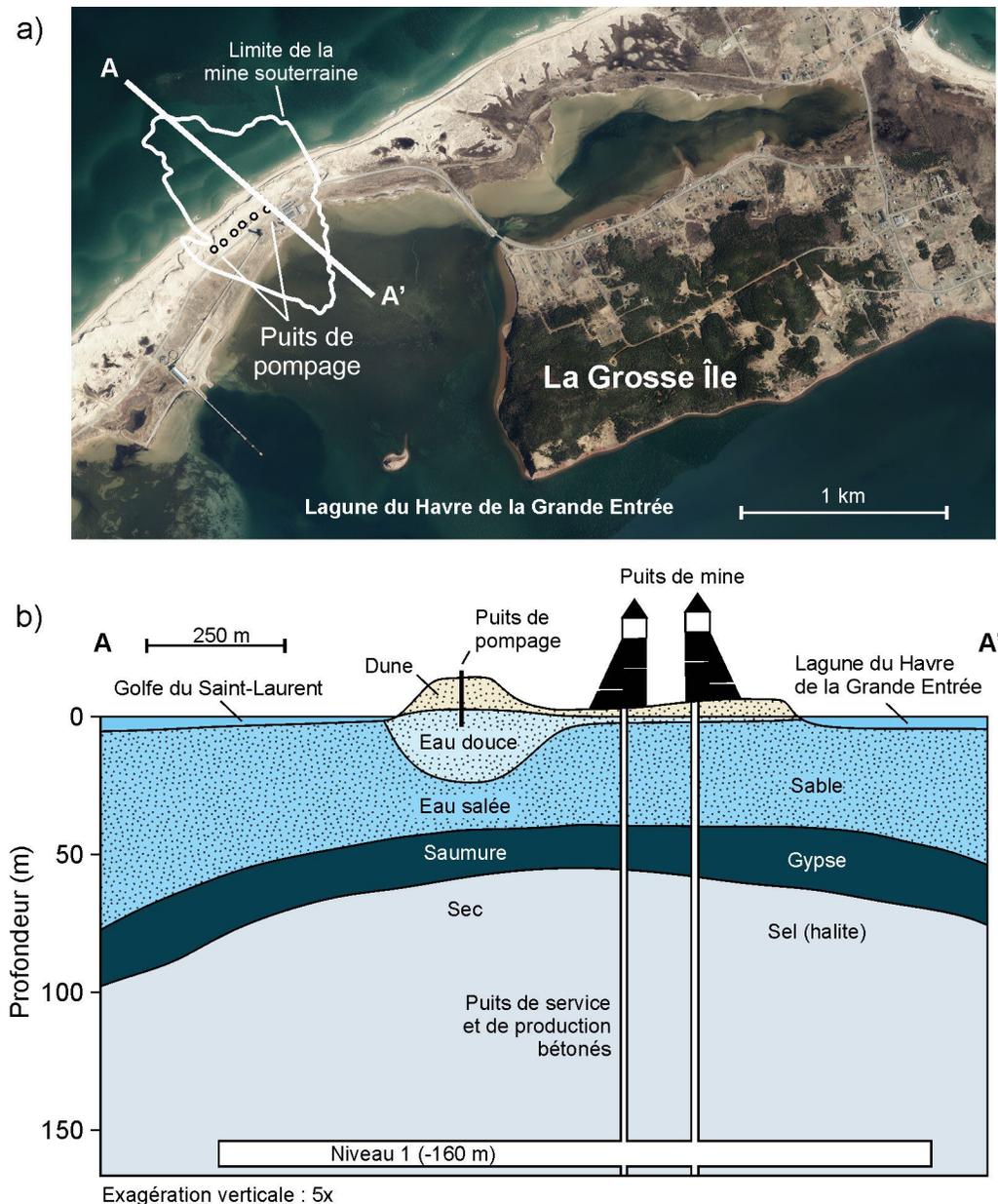
Tel que mentionné à la Section 8.4.4, l'eau souterraine du secteur de l'Étang-du-Nord, sur l'île du Cap aux Meules, est dominée par l'anion du chlorure. Un certain degré de contamination de la nappe par les sels de voirie, tel que proposé par le Groupe Madelin'Eau (2004), est possible.

## **6.2.5 L'exploration et l'exploitation des ressources naturelles**

### **6.2.5.1 Les gisements de sel**

Tel qu'il a été décrit dans la Section 5.1, le contexte géologique de l'archipel est relié à la présence de diapirs de sel. Ces derniers se retrouvent sous les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et de la Grosse Île. Toutefois, une seule mine de sel a été exploitée et est toujours en production sur l'archipel, soit par les Mines Seleine, sur le cordon dunaire au sud de la Grosse Île, (Figure 6.2a). La mine est exploitée par la méthode de chambres et piliers. Son empreinte de surface a une longueur d'environ 1 km sur une largeur d'environ 500 m. Une bonne partie de la mine se retrouve donc sous la lagune du Havre de la Grande Entrée et sous le Golfe du Saint-Laurent. Le premier niveau de la mine est situé à une profondeur d'environ 160 m, et en 2013, l'exploitation en était au niveau 6, soit à 406 m de profondeur (Mines Seleine, 2013).

Selon le BAPE (2013), l'exploitation de la mine n'a pas d'impact sur les ressources en eau souterraine. En effet, son exploitation ne nécessite pas le rabattement de la nappe phréatique, car le diapir de sel ne contient pas d'eau. Le diapir serait recouvert d'une couche de gypse saturée en saumure, donc sans potentiel de dissolution du sel (Figure 6.2b; Mines Seleine, 2013). De plus, le procédé d'exploitation ne nécessite pas d'eau douce. Toutefois, de l'eau douce est nécessaire pour les douches et les toilettes, ainsi que pour le nettoyage d'équipements sous terre. Cette eau est prélevée dans six puits de pompage de 3 m de profondeur situés dans les dunes de sable à proximité de la mine. Un débit moyen de 17 m<sup>3</sup>/j y est prélevé, avec un débit moyen de 2 L/min/puits, pour un maximum de 9 L/min/puits (Mines Seleine, 2013). Pour la consommation humaine, la mine utilise de l'eau embouteillée.



**Figure 6.2 :** a) Localisation de Mines Seleine près de la Grosse Île indiquant les limites de la mine souterraine et la position des puits de pompage. b) Coupe schématique illustrant le contexte hydrogéologique du secteur de la mine. Modifié de Mines Seleine (2013)

### 6.2.5.2 Les carrières et sablières

Le MELCC recense pas moins de 48 carrières ou sablières aux îles de la Madeleine, dont 38 ont un statut d'actif et 10 un statut d'inactif. Parmi les actives, 27 sont opérées par des entreprises privées, tandis que le MERN, le MTQ et la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine sont responsables des 11 autres. On y utilise fréquemment de la machinerie lourde et on y entrepose parfois de la matière sèche et des hydrocarbures. Des accidents liés à ces activités, comme un déversement de carburant, constituent le risque le plus important pour l'eau souterraine. Ce risque est accentué par l'exploitation des matières minérales, car la couche de sol, qui pourrait réduire la vitesse d'infiltration des contaminants en surface,

y est éliminée. De plus, les sables et graviers étant des matériaux très perméables, les contaminants peuvent y percoler facilement jusqu'à la nappe. Enfin, en retirant de la matière minérale, on rapproche la nappe de la surface et on diminue l'épaisseur de la zone non saturée qui peut moins agir comme une zone tampon dans laquelle certains contaminants pourraient être atténués. En somme, les carrières, gravières et sablières sont des endroits où la nappe devient très vulnérable à la contamination.

### **6.2.5.3 L'exploration et l'exploitation des hydrocarbures**

Le rapport d'enquête et d'audience publique du BAPE (2013) portant sur les effets liés à l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux îles de la Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière, a été réalisée vers la fin d'une période d'effervescence reliée à l'exploration pétrolière et gazière qui a débutée au début des années 2000. À cette époque, l'augmentation du prix du gaz et pétrole a été significative et une nouvelle vision de l'exploration des hydrocarbures stockés dans des réservoirs non conventionnels est apparue (Marcil, 2021). Suite à des découvertes de gaz de schiste dans les Basses-Terres-du-Saint-Laurent, les travaux d'exploration se sont étendus à l'île d'Anticosti, la Gaspésie, et éventuellement aux îles de la Madeleine. En effet, l'entreprise GASTEM détenait un permis de recherche qui couvrait presque l'ensemble de l'archipel madelinot (BAPE, 2013). Elle projetait alors d'effectuer un forage d'exploration gazière de 2 500 m de profondeur à proximité du diapir de sel qui s'étend de l'île du Cap aux Meules à l'île du Havre aux Maisons (Groupe Madelin'Eau, 2011) afin d'étudier les pièges d'hydrocarbures associés.

Dans ce contexte, une audience publique a été confiée au BAPE afin « *d'informer la population sur les enjeux de ces activités en milieu insulaire, de la consulter et d'éclairer le gouvernement dans sa réflexion quant aux mesures à prendre pour assurer la protection des nappes phréatiques des îles de la Madeleine* » (BAPE, 2013). Dans son rapport, la commission a évalué les risques associés à différentes phases de l'exploration et de l'exploitation éventuelle des hydrocarbures et les conséquences que cela pourrait avoir sur les nappes phréatiques. La commission d'enquête a constaté qu'il existe des risques de contamination de l'eau souterraine associés à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures.

Le BAPE a également constaté que le cadre réglementaire en vigueur pour encadrer les activités potentiellement polluantes associées à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures n'est pas adapté à la réalité de l'archipel. En effet, le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) est articulé autour du principe de protection des sources d'eau potable. Au niveau de l'exploitation des hydrocarbures, l'article 32 spécifie qu' « *Il est interdit d'aménager un site de forage ou de réaliser un sondage stratigraphique [...] à moins de 500 m d'un site de prélèvement d'eau effectué à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire.* » Or, aux îles de la Madeleine, en cas d'intrusion d'eau salée dans un puits de captage municipal, ou encore la contamination de son aire d'alimentation, un autre ouvrage de captage devra être construit pour le remplacer. Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'alimentation en eau potable, et que les aquifères sont de vulnérabilité élevée (Section 8.6), l'ensemble des ressources en eau souterraine devraient être protégées afin d'assurer l'accès à la ressource en cas de besoin. Ainsi, ce ne sont pas les sources d'eau potable qui devraient être protégées, mais l'ensemble des ressources en eau souterraine susceptibles d'être exploitées. C'est également l'avis de la commission (BAPE, 2013) :

*« La commission d'enquête est d'avis, considérant le **caractère vulnérable** du territoire des îles de la Madeleine et de sa ressource en eau, que des dispositions légales propres à ce territoire*

*devraient être adoptées, en concertation avec les intervenants des îles, pour assurer une protection de ce milieu dans un contexte de développement durable. »*

*« Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'approvisionnement en eau potable, des dispositions réglementaires et des politiques appropriées apparaissent nécessaires. »*

*« La commission d'enquête, au nom des principes de protection de l'environnement et de prévention, est d'avis que, pour les îles de la Madeleine, le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs devrait développer une réglementation particulière visant à protéger et à préserver l'ensemble des ressources aquifères, tant celles exploitées que celles exploitables et non encore exploitées, pour les générations futures. Un tel règlement devrait considérer la possibilité d'étendre à l'ensemble des ressources en eau souterraine les mesures pour protéger les sources d'alimentation en eau potable. »*

### 6.2.6 L'agriculture

Tel que mentionné à la Section 2.4.2, l'occupation du sol liée à l'agriculture couvre 14,0 km<sup>2</sup>, soit 7 % du territoire d'étude. Les activités agricoles se localisent à proximité des secteurs anthropiques, surtout sur les plateaux de grès où l'on retrouve les aquifères d'intérêt et où la nappe est la plus vulnérable aux contaminations depuis la surface (Section 8.6).

La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a inventorié les activités agricoles pratiquées sur son territoire en 2020. Les informations provenaient majoritairement du MAPAQ et de l'organisme Le Bon goût frais des Îles, ainsi que des contacts directs avec les producteurs, des visites de terrain et l'analyse des orthophotographies de mai 2019. L'inventaire détermine que plus de la moitié (56 %) des terres agricoles de son territoire servent à la culture du foin (Tableau 6.1). Les pâturages suivent en termes de superficie, représentant 41 % des terres agricoles. En considérant ces deux activités reliées à l'élevage, presque la totalité (97 %) des terres agricoles sert principalement pour l'alimentation des bovins, ovins, équidés, volailles et autres animaux de ferme. Seulement 2 % des terres agricoles servent à la culture maraîchère, céréalière, de raisin, de petits fruits et de fleurs. La culture de la tourbe et la pelouse compte pour 1 % des terres agricoles.

**Tableau 6.1 : Superficie du territoire de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine occupée par les activités agricoles**

Classes	Superficie (ha)	Proportion
Culture du foin	297	56 %
Pâturage	221	41 %
Culture maraîchère, céréalière et vignoble	11	2 %
Tourbe et pelouse	3	1 %
Poulailler	1	0 %
<b>Total</b>	<b>533</b>	<b>100 %</b>

L'utilisation d'engrais et les déjections animales associées aux activités agricoles posent un risque de contamination en microorganismes et en nitrites et nitrates de l'eau souterraine. Les pesticides, à des concentrations suffisamment élevées dans l'eau potable, peuvent aussi impacter la santé humaine.

L'analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable (Tremblay et coll., 2022) révèle que, dans les cinq dernières années, plusieurs concentrations en nitrites et nitrates dépassant 20 % de la norme applicable de 10 mg/L du Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q-2, r.40) ont été mesurées dans les quatre réseaux municipaux d'alimentation en eau potable. Les travaux d'échantillonnage et d'analyse de la qualité de l'eau réalisés dans le cadre de la présente étude montre aussi que de nombreux puits domestiques ont une concentration supérieure à 3 mg/L, et même plus élevée que la norme de 10 mg/L dans deux cas (Tableau 8.17 de la Section 8.5.2.1). Ces observations démontrent l'influence certaine d'activités humaines (INSPQ, 2019). La plupart de ces puits se situent sur l'île de la Grande Entrée, La Grosse Île, l'île aux Loups et l'île d'Entrée, où très peu d'activités agricoles s'y pratiquent. Les installations septiques sembleraient donc être les causes les plus probables de ces contaminations.

Les concentrations en pesticides dans l'eau potable du réseau de l'île du Cap aux Meules, le seul ayant des mesures disponibles, se sont avérées sous les seuils de 20 % des normes de 2016 à 2020 (Tremblay et coll., 2022). L'impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau souterraine semble ainsi limité.

### **6.2.7 Les cimetières**

On retrouve six cimetières sur le territoire d'étude, situés sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, du Havre Aubert et la Grosse Île. Un cadavre humain en décomposition produit entre 0,4 et 0,6 L de lixiviat par kg de poids corporel (Zychowski et Bryndal, 2015). Ce lixiviat est composé en majorité d'eau, mais contient tout de même jusqu'à 30 % de sels sous forme d'ions contenant de l'azote ou du phosphore. Une contamination de la nappe en nitrites et nitrates est donc possible. Le lixiviat contient également des bactéries et des virus pouvant potentiellement contaminer les eaux souterraines (INSPQ, 2015). Enfin, le formaldéhyde, un composé organique au potentiel cancérigène, est issu du processus d'embaumement et pourrait aussi se retrouver dans l'eau souterraine, mais les connaissances à ce sujet sont limitées (Bordeleau et coll., 2008).

### **6.2.8 Les activités aéroportuaires**

L'aéroport des Îles-de-la-Madeleine (code YGR de l'Association du transport aérien international), situé sur l'île du Havre aux Maisons, est en fonction depuis 1956. Il est désigné comme un aéroport éloigné selon la Politique nationale des aéroports, ce qui implique que le gouvernement fédéral est tenu de poursuivre le financement de ses activités, puisque le transport aérien est le seul moyen de transport fiable à l'année pour les Madelinots. L'aéroport est ainsi en opération en hiver, ce qui nécessite le déglacage des pistes et le dégivrage des avions. Jusque dans les années 90, l'urée était communément utilisée au Canada pour déglacer les pistes. Des concentrations élevées en nitrates dans l'eau souterraine sont fréquentes à proximité des aéroports. Le transport aérien nécessite également l'entreposage et le transbordement d'une grande quantité de carburants, entraînant des risques de déversements ou de fuites. Des problématiques liées aux nitrates et aux hydrocarbures ont effectivement été observées dans les sols et les eaux souterraines à l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine, et de nombreuses études de caractérisation ont été mandatées par Transport Canada au fil des années

(Biogénie inc., 1993 et 2015; Roche, 1999; TechnoRem, 2005; Entraco inc., 2008 et 2014; Stantec, 2018).

### **6.2.9 Les activités commerciales et industrielles**

De nombreuses activités commerciales et industrielles peuvent émettre des contaminants dans l'environnement dans le cours normal de leurs opérations ou en cas d'accident. L'analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable (Tremblay et coll., 2022) répertorie ces établissements, mais dans les aires de protection des puits municipaux et leurs environs immédiats seulement. Cet inventaire n'a pas été effectué pour l'ensemble du territoire d'étude du portrait des ressources en eau souterraine.

Les fuites de carburant sont un risque réel lié aux 12 stations-service dénombrées sur le territoire de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine lors de l'enquête du BAPE (2013). D'ailleurs, parmi les terrains contaminés inventoriés par le MELCC, quelques-uns sont issus d'anciennes stations-service. L'enquête du BAPE (2013) a également répertorié 26 garages d'entretien d'automobiles. Des huiles, des solvants et des métaux lourds peuvent y être largués au sol et s'infiltrer jusqu'à la nappe. Des problématiques semblables peuvent provenir des garages municipaux, de ferrailleurs et de sites d'accumulation des carcasses d'automobiles, clandestins ou non. Le risque lié aux établissements entreposant, manipulant ou vendant des produits organiques ou minéraux, tel que des matières dangereuses, est aussi non négligeable. Enfin, les aires de stationnement et de livraison, par exemple associées aux centres commerciaux, peuvent générer des eaux de ruissellement collectant des hydrocarbures, des sels de déglacage et d'autres produits chimiques, qui s'infiltrent ensuite vers la nappe en bordure des surfaces imperméables.

## **6.3 Les changements climatiques**

Outre les demandes accrues en eau potable, les principaux changements qui pourraient influencer la disponibilité et la qualité des eaux souterraines aux îles de la Madeleine concernent les variations de précipitations et de température, les variations du niveau marin et l'érosion des berges. Notamment, ces changements devraient causer des variations de niveau de la nappe et de l'interface eau douce – eau salée, modifiant ainsi l'épaisseur de la lentille d'eau douce et donc les volumes d'eau disponibles. Pour cette raison, les projections de recharge prenant en compte les changements climatiques ont été intégrées dans des simulations visant à déterminer la quantité d'eau maximale qu'il sera possible de prélever en 2050 du réseau de puits actuel tout en prévenant leur contamination par une intrusion d'eau salée (Section 9.1.2). Également, la remontée du niveau marin relatif a été intégrée aux simulations permettant de déterminer les possibilités de pompage des réseaux de puits actuel en considérant l'effet des changements climatiques d'ici 2050 (Section 9.1.2). Enfin l'érosion côtière n'apparaît pas comme une problématique majeure pour la disponibilité de l'eau souterraine et n'a pas été considérée dans les simulations numériques. Un retour et une discussion de ces résultats sont présentés à la Section 9.2.4.

## 7 MODÉLISATION

### 7.1 Objectifs de la modélisation

Le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* repose en grande partie sur l'usage de modèles numériques. Ceux-ci ont permis de produire la carte piézométrique et de déterminer la position de l'interface eau douce – eau salée, l'épaisseur et le volume de la lentille d'eau douce, et le bilan hydrologique incluant la recharge. Les modèles ont également été utilisés afin de simuler les remontées de l'eau salée sous les puits de captage et évaluer l'impact des pompages municipaux actuels sur la disponibilité de la ressource. Enfin, ils ont été utilisés afin d'identifier les aires d'alimentation des aquifères potentiellement exploitables sur lesquels des mesures de protection de la ressource devraient être mises en place.

Tel qu'exposé ci-dessus, la modélisation est d'abord utilisée afin d'obtenir une carte piézométrique des principales îles rocheuses et habitées de l'archipel, et ainsi interpréter les directions d'écoulement de l'eau souterraine. Une autre méthode commune consiste à tracer la piézométrie par interpolation spatiale à partir d'observations de niveau d'eau, mais celles-ci n'étaient pas assez abondantes sur le territoire couvert par l'étude pour utiliser cette méthode. Les observations de niveau d'eau recueillies sur le territoire sont aussi intégrées au processus de modélisation afin d'obtenir une surface piézométrique la plus réaliste possible.

Dans un second temps, la modélisation numérique est utilisée pour déterminer la profondeur de l'eau souterraine salée et ainsi déduire l'épaisseur et le volume de la lentille d'eau douce souterraine (voir la description du contexte hydrogéologique à la Section 5.2). Il existe trois grandes approches pour cartographier la lentille d'eau douce. La première est l'interpolation spatiale d'observations de son épaisseur. Il peut s'agir d'observations directes dans des puits, ou indirectes à l'aide de méthodes géophysiques. À l'exception de l'île de la Grande Entrée où de nombreuses mesures géophysiques ont été effectuées, il n'existe pas suffisamment d'observations pour l'interpolation spatiale. La seconde approche repose sur la relation de Ghyben-Herzberg qui relie l'épaisseur de la lentille d'eau douce à l'élévation de la surface libre de la nappe phréatique (Section 5.2). Il s'agit d'une approche couramment utilisée, mais qui produit des résultats moins fiables dans les zones où certaines hypothèses de l'approche ne peuvent être respectées, par exemple à proximité des puits de captage et près des côtes où l'hypothèse des conditions hydrostatiques ne peut être vérifiée (Section 5.2.1.1). Enfin, la dernière approche, retenue pour la présente étude, consiste à déterminer l'épaisseur de la lentille d'eau douce par modélisation numérique.

En troisième lieu, la modélisation permet d'obtenir des bilans hydrologiques sur chaque île. Ils donnent lieu à une meilleure compréhension de l'utilisation actuelle de la ressource, notamment la part annuelle de l'eau rechargée dans les aquifères qui est prélevée à des fins de consommation humaine.

Quatrièmement, la modélisation numérique est utilisée pour évaluer la gestion durable de l'exploitation de la ressource, tout en prenant en compte les changements climatiques et les besoins futurs en eau. Entre d'autres termes, les réseaux de puits municipaux actuels permettent-ils de subvenir à la demande en eau actuelle et future, tout en évitant une contamination des puits de captage suite à une intrusion d'eau salée? Pour ce faire, la remontée graduelle de l'interface eau douce – eau salée suite à la mise en

service d'un puits est simulée. La méthodologie introduit ensuite un problème d'optimisation sous contraintes probabilistes, où les débits de pompage sont à maximiser tout en évitant les intrusions d'eau salée dans les puits. Cet outil permet une analyse quantitative des ressources en eau souterraine qui prend en considération le contexte hydrogéologique particulier de l'archipel, la géométrie complexe des aquifères, le nombre important de puits de captage municipaux et les incertitudes sur les observations disponibles.

Enfin, la modélisation numérique est utilisée afin de cartographier l'aire d'alimentation des aquifères d'intérêt pour l'exploitation de la ressource, afin de favoriser leur protection. Une approche par traçage de particule, semblable à celle communément utilisée pour l'identification des aires de protection des sources d'eau potable, est appliquée aux ressources en eau potable disponibles.

## 7.2 Terminologie

Le travail de modélisation fait appel à une terminologie spécifique dont les termes principaux utilisés dans le rapport sont définis ici. Les processus physiques se rapportant à l'hydrogéologie (ex. : écoulement de l'eau dans un milieu poreux, pompage d'eau souterraine, transpiration, ruissellement de surface, etc.) peuvent être décrits par des équations mathématiques. La résolution numérique des équations mathématiques se traduit par un code informatique, ou programme. On utilise le terme « programme » pour désigner le système de résolution des équations mathématiques. Par exemple, MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017) et SWB2 (Westenbroek et coll., 2018) sont désignés sous ce terme. La représentation d'un territoire spécifique se basant sur un programme est appelée « modèle ». Dans le cadre de cette étude, plusieurs modèles ont été construits, soit un pour chacune des îles rocheuses principales. Avec un modèle d'écoulement, on peut par exemple simuler la piézométrie et l'épaisseur de la lentille d'eau douce sur le territoire concerné.

## 7.3 Choix des programmes informatiques

Le choix des programmes a été guidé par les critères suivants, directement liés aux objectifs de modélisation :

- Représenter la variabilité spatiale du territoire (ex. : topographie, géologie, recharge);
- Distinguer les écoulements d'eau douce des écoulements d'eau salée;
- Obtenir des résultats quantifiés (ex. : piézométrie, profondeur de l'interface eau douce – eau salée, bilan d'eau);
- Limiter les coûts de calculs (afin d'intégrer un processus de calibration et procéder aux simulations d'exploitation durable des pompes municipales via un algorithme d'optimisation)

La recharge a d'abord été estimée de façon distribuée au sein d'un modèle de bilan hydrologique basé sur le programme Soil Water Balance 2 (Westenbroek et coll., 2018 – ci-après SWB2). Les écoulements ont ensuite été simulés avec le programme MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017) et le module d'intrusion saline SWI2 (Bakker et coll., 2013) s'y rapportant, tous deux développés par la Commission géologique des États-Unis (United States Geological Survey). Ces deux modèles ont été utilisés de manière indépendante, mais les résultats de SWB2 ont été utilisés comme données d'entrée pour MODFLOW (voir plus loin). Une version du programme plus récente que MODFLOW-2005 est

actuellement disponible, mais le module SWI2 est uniquement compatible avec la version MODFLOW-2005. Le programme MODFLOW-2005 simule l'écoulement d'eau souterraine en trois dimensions en régime permanent et transitoire en se basant sur la méthode des différences finies. Le module SWI2 permet en plus de simuler les écoulements d'eau souterraine aux densités variables, et permet donc de prendre en compte l'eau salée. Contrairement à des versions du programme plus récentes, MODFLOW-2005 ne permet pas le raffinement local du maillage près des puits de pompage. Le pompage appliqué sur une maille de 20 m sur 20 m induit un rabattement très faible par rapport à celui qui aurait été induit par le pompage dans une maille plus petite (de la taille du diamètre du puits par exemple). Le module MNW2 (Konikow et coll., 2009) s'appuie sur le rayon des puits, la charge hydraulique et la transmissivité de l'aquifère pour effectuer une correction des cônes de rabattement modélisés et s'approcher d'une représentation plus réaliste. Le module MODPATH (Pollock, 2017) permet quant à lui de simuler le traçage de particules à partir des modèles d'écoulements. Des molécules peuvent être introduites à la surface du modèle, et suivies le long de leur trajet jusqu'à leur sortie du modèle. L'outil PEST-OPT (White et coll., 2018) est un algorithme d'optimisation utilisé pour les simulations d'exploitation durable du réseau des puits municipaux. Il permet de maximiser les débits de pompage tout en évitant leur contamination par l'eau salée.

#### 7.4 Hypothèses de modélisation

Un compromis est nécessaire entre la représentation précise des processus physiques en jeu, la limitation des coûts de calcul et la disponibilité des données d'entrée. Les hypothèses de modélisation suivantes permettent l'atteinte de cet équilibre :

- (1) L'interface eau douce – eau salée est abrupte. Les profils de conductivité électrique dans les piézomètres du territoire d'étude qui traversent l'interface, présentés à la Section 5.2.1, mettent en valeur une interface de quelques mètres d'épaisseur seulement, ce qui tend à valider cette hypothèse (Figure 5.23). La modélisation d'une interface abrupte permet de s'affranchir des effets de diffusion et de dispersion, donc de gagner un coût de calcul considérable.
- (2) Les contacts entre les unités géologiques sont verticaux. Les coupes géologiques présentées à la Section 5.1.1.2 montrent effectivement des failles subverticales dans les premières centaines de mètres de profondeur dues aux remontées des diapirs (Figure 5.7). Les contacts horizontaux délimitent les roches d'une même formation géologique (Membres de l'Étang-du-Nord et de l'Étang-des-Caps) ou d'un même groupe géologique (Formation Cap au Diable et Formation du Havre aux Maisons).
- (3) Les aquifères sont homogènes au sein de chaque unité géologique. La majorité des puits et piézomètres du territoire sont localisés dans l'unité géologique du Membre de l'Étang-des-Caps (Figure 4.3), pour lequel de nombreuses mesures des propriétés hydrauliques sont disponibles (Section 8.1). Même s'il existe une certaine hétérogénéité dans cet aquifère l'écart-type des valeurs de conductivité hydraulique est relativement faible. L'hypothèse d'homogénéité utilisée dans le modèle demeure une hypothèse simplificatrice. Elle est discutée lors de la description de la calibration, en Annexe 11.
- (4) Les processus physiques en surface et en zone non saturée (ex. : infiltration des précipitations, percolation, transpiration) peuvent être approximés par une recharge imposée sur la surface libre de la nappe. Le calcul de la recharge à imposer est fait en amont de la construction des modèles

d'écoulement (Section 8.4.2 et Annexe 10). Le recours à cette variable permet de simuler seulement les écoulements en zone saturée et de s'affranchir des processus en zone non saturée, plus coûteux en termes de paramétrisation. La modélisation de ces processus exige davantage de paramètres, par exemple la porosité et les courbes de rétention du milieu poreux, et de temps de calcul.

- (5) Les variations saisonnières sont négligeables. Bien que les débits d'exploitation dans les puits municipaux (Section 3.1.3) et la recharge (Section 8.4.3.1) varient au cours de l'année, l'impact de ces variations sur les niveaux de nappe est généralement faible, comme le montrent les suivis piézométriques disponibles (Section 8.3.1.4).
- (6) Le système a atteint un régime permanent. Les puits municipaux ont été mis en fonction à des dates variées, entre 1960 et 2013 (Section 3.1.1), et le temps nécessaire pour la lentille d'eau douce pour se mettre à l'équilibre lors d'un changement de contrainte (par exemple le début d'un pompage) dépend de nombreux facteurs, notamment la géologie, la profondeur de l'interface et la recharge. La remontée de l'interface sous les puits de pompage municipaux est toujours en cours et l'établissement de l'équilibre nécessite encore plusieurs décennies pour la plupart des puits (Section 9.1). L'hypothèse du régime permanent est donc erronée, et actuellement sur le territoire, l'interface sous les puits de pompage est plus profonde que les résultats de la modélisation. Pour les simulations d'exploitation durable de la ressource, on se place donc dans une situation conservatrice, en considérant une nappe plus proche de la surface qu'elle ne l'est en réalité.

## 7.5 Méthodologie de la modélisation

La Figure 7.1 présente la méthodologie générale de la modélisation adoptée dans cette étude. Le détail de la construction du modèle hydrologique avec le programme SWB2 et l'identification des données d'entrées utilisées sont disponibles à l'Annexe 10. Les données d'entrées utilisées et le processus de calibration des modèles d'écoulements souterrains, basés sur le programme MODFLOW-2005 et le module SWI2 sont détaillés en Annexe 11. L'Annexe 12 documente la méthodologie adoptée pour les simulations d'exploitation durable.

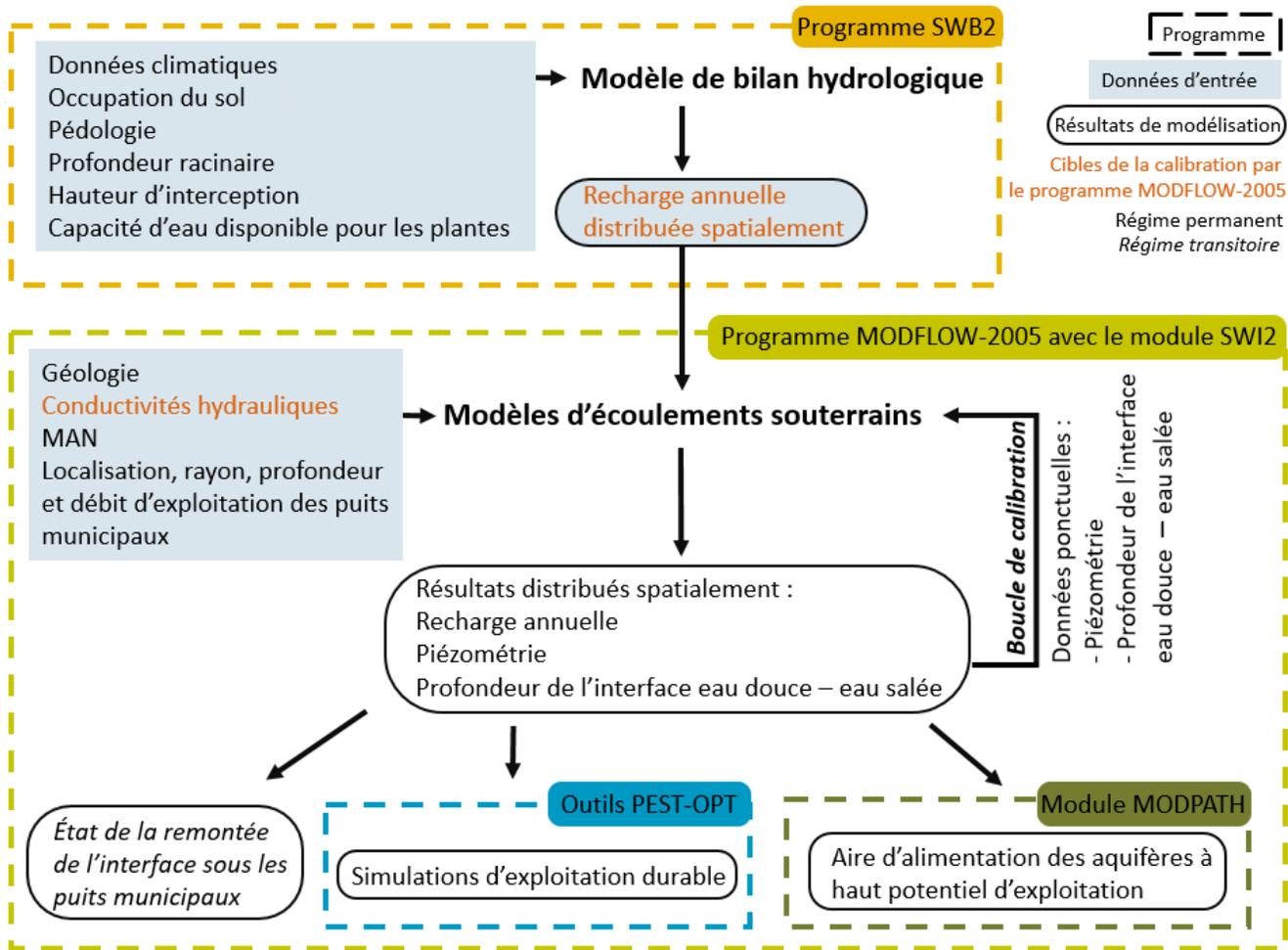


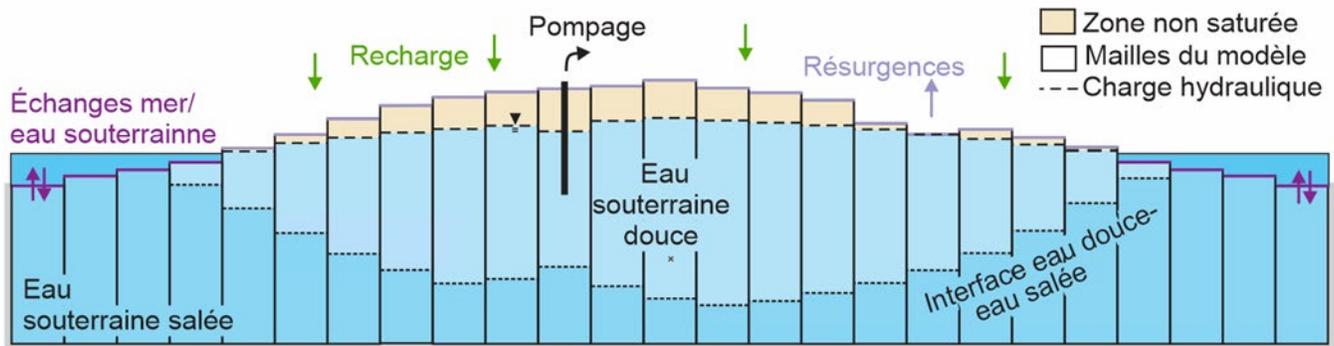
Figure 7.1 : Méthodologie simplifiée de la modélisation du bilan hydrologique et des écoulements souterrains

### 7.5.1 Construction des modèles d'écoulements souterrains

Les trois hypothèses d'interface abrupte, des contacts géologiques verticaux et d'uniformité au sein de chaque unité géologique permettent de simplifier le modèle, puisqu'on peut ainsi ne considérer qu'une seule couche dans la dimension verticale. L'approximation de Dupuit est adoptée dans SWI2, c'est-à-dire que l'écoulement vertical de l'eau souterraine est négligé. Dans la couche, on considère deux zones distinctes qui correspondent à l'eau douce et à l'eau salée, dans lesquelles la densité de l'eau est constante pour chacune (respectivement de 1,0 et 1,025). Spatialement, le modèle est discrétisé en mailles régulières de 20 m par 20 m. La Figure 7.2 schématise un modèle d'écoulement d'eau souterraine d'une île. La lentille d'eau douce est délimitée par au-dessus par la surface piézométrique, par en dessous par l'interface eau douce – eau salée, et latéralement par la mer. L'aquifère est alimenté par la recharge issue des précipitations, et l'eau souterraine fait résurgence sur terre lorsque la charge hydraulique dépasse la surface du sol ou dans la mer près des côtes. Les pompages municipaux provoquent un rabattement de la nappe et une remontée locale de l'interface eau douce – eau salée.

Un modèle est préparé pour chaque île rocheuse principale et habitée. Les cordons dunaires, qui ne sont pas directement à proximité d'une île rocheuse, ne sont pas compris dans les modèles. La modélisation des écoulements souterrains a d'abord été réalisée à l'échelle pilote, sur l'île de la Grande Entrée (Coulon et coll., 2021). La méthodologie employée sur les autres îles a été adaptée, avec les changements suivants :

- Considérant les faibles charges hydrauliques sur l'île de la Grande Entrée, dues au relief de la surface du sol moins important, le fond du modèle est fixé à 300 m sous le niveau moyen marin, ce qui est amplement suffisant pour modéliser l'ensemble de la lentille d'eau douce. À l'exception de l'île aux Loups, les autres îles présentent des buttes plus hautes en altitude, avec des observations piézométriques plus élevées, et donc une interface beaucoup plus profonde. Un compromis a été fixé avec un fond de modèle à 500 m sous le niveau de la mer. L'objectif est de modéliser la lentille d'eau douce le mieux possible, tout en respectant l'hypothèse d'homogénéité verticale des unités géologiques. À la Grosse Île, comme une discordance horizontale entre deux unités géologiques différentes (Membre de l'Étang-du-Nord et Formation du Havre aux Maisons) est située autour de 350 m sous le niveau marin (Figure 5.7), le fond de ce modèle a été fixé à cette profondeur.
- Sur l'île de la Grande Entrée, une recharge uniforme a été considérée, tandis que pour les autres îles, une recharge spatialisée à une résolution de 20 m issue du modèle de bilan hydrologique basé sur SWB2, illustrée à la Figure 8.22, a été utilisée. Dans les deux cas, la recharge est calibrée. La valeur de recharge uniforme calibrée sur le modèle de l'île de la Grande Entrée est de 544 mm/an, très proche de la recharge moyenne sur cette île issue du modèle SWB2 (559 mm/an, voir (Tableau 8.12).
- Sur l'île de la Grande Entrée, la possibilité que l'eau souterraine puisse faire résurgence sur la portion terrestre du territoire, par exemple dans des cours d'eau ou des milieux humides, n'a pas été intégrée au modèle. Cette option n'est pas essentielle, puisqu'en dehors des zones côtières, la nappe n'affleure pas à la surface. La possibilité pour l'eau de faire résurgence sur terre si la charge hydraulique dépasse la surface du sol a été intégrée aux modèles pour les autres îles.



**Figure 7.2 : Représentation simplifiée en coupe du modèle pour une île. L'eau souterraine est représentée par une seule couche contenant des zones de densité d'eau variable, soit l'eau douce et l'eau salée, séparées par une interface abrupte. À noter que le schéma n'est pas à l'échelle et que d'après la relation de Ghyben-Herzberg, la profondeur de l'interface eau douce – eau salée par rapport au niveau de la mer est égale à 40 fois la charge piézométrique au-dessus du niveau de la mer**

Les hypothèses posées pour les modèles d'écoulements (interface eau douce – eau salée abrupte, contacts géologiques verticaux, aquifère homogène, écoulements en zone saturée seulement, variations saisonnières négligeables et régime permanent) permettent de les construire avec un nombre d'intrants raisonnable :

- Modèle altimétrique numérique;
- Conductivité hydraulique des différentes unités géologiques;
- Localisation, rayon, profondeur et débit d'exploitation des puits municipaux;
- Recharge.

Le processus de calibration permet de s'assurer d'une représentation convenable de la réalité et s'appuie sur les données de piézométrie et, pour l'île de la Grande Entrée, de mesures de la profondeur d'interface eau douce – eau salée issues de relevés géophysiques (Section 4.1.3). La calibration a été menée sur les îles qui disposent de suffisamment de données observées (îles de la Grande Entrée, du Havre aux Maisons, du Cap aux Meules et du Havre Aubert) et a porté sur la conductivité hydraulique et la recharge. Lors de la calibration du modèle de l'île du Cap aux Meules, la géologie dans le secteur Fatima a été modifiée avec l'ajout d'une bande de roches de l'unité géologique du Membre de l'Étang-du-Nord entre les roches volcaniques de la Formation du Cap au Diable et les grès du Membre de l'Étang-des-Caps (voir Figure A.85 de l'Annexe 11). Les calibrations sont indépendantes pour chaque modèle et pourtant les valeurs finales des paramètres obtenues sont très proches (Annexe 11). Comme ces valeurs sont très proches, elles ont été moyennées et appliquées sur Grosse Île, l'Île aux Loups et l'île d'Entrée. Le puits HQ-2 n'a pas été considéré dans le modèle de l'île d'Entrée étant donné ses faibles débits et le nombre de personnes alimentées.

Comme les observations piézométriques utilisées dans la calibration ont été réalisées à des périodes variées (années et saisons), les débits d'exploitation des puits municipaux à utiliser doivent également rendre compte d'une large période. Dans l'étape de calibration, les débits moyens sur la période 2002-2020, présentés au Tableau 3.3 (section 3.1.3), ont été utilisés pour tous les puits hormis ceux de l'île de la Grande-Entrée puisque ceux-ci ont été mis en service plus tard. Pour les puits de cette île, c'est la

période 2014-2020 qui a été considérée. Ainsi, bien que certains puits n'aient pas été en opération récemment, ils ont tout de même été considérés en pompage (ex. : puits GE-09-03 sur l'île de la Grande Entrée, P4 sur l'île du Havre aux Maisons et PU5 sur l'île du Cap aux Meules). Par contre, lors des analyses subséquentes, par exemple l'évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux (Section 9.1.1) et les simulations des risques d'intrusion dans les puits de captage (Section 9.1.2), les puits GE-09-03 et PU5 sont considérés comme à l'arrêt. Comme le puits P4 sur l'île du Havre aux Maisons a été remis en fonction en 2022, il est donc compris dans ces analyses.

La description du modèle de bilan hydrologique basé sur SWB2 est résumée à la Section 8.4.2 et présentée en détail à l'Annexe 10.

### **7.5.2 Développement d'outils quantitatifs pour la gestion de la ressource**

La construction des modèles et leur calibration permettent d'obtenir une recharge annuelle (paramètre calibré), de même que la piézométrie et la position de l'interface eau douce – eau salée (sorties du modèle). Outre ces résultats, les modèles d'écoulements souterrains calibrés permettent de produire des outils quantitatifs utiles pour la gestion durable de la ressource. En particulier dans cette étude, trois outils ont été développés.

#### **7.5.2.1 Évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux**

La mise en pompage d'un puits provoque une baisse locale du niveau de la nappe, définie comme le cône de rabattement, et une remontée de l'interface eau douce – eau salée à l'aplomb du puits (Section 5.2). La vitesse de remontée de l'interface est difficile à estimer. Il est pourtant pertinent d'évaluer si le système actuel est à l'équilibre, et dans le cas contraire, d'estimer le moment d'atteinte de cet équilibre. À partir d'un état initial sans pompage, des simulations en régime transitoire ont été réalisées pour suivre l'évolution de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée après la mise en fonction des puits municipaux, permettant ainsi d'évaluer la dynamique de remontée de l'interface sous les puits d'alimentation (Section 9.1).

#### **7.5.2.2 Simulations d'exploitation durable des ressources en eau avec le réseau de puits municipaux**

Un des objectifs principaux justifiant le travail de modélisation de ce projet, outre la description quantitative du contexte hydrogéologique particulier des îles de la Madeleine, est d'évaluer quelles sont les conditions qui permettent l'exploitation durable de la ressource en eau souterraine, en considérant les changements climatiques (Section 9.1.2). Plus précisément, il s'agit de déterminer la quantité d'eau maximale actuelle et future qu'il est possible de prélever à l'aide du réseau de puits municipaux en place, tout en prévenant la contamination des puits de captage par une intrusion d'eau salée. Cette quantité d'eau potentiellement disponible peut ensuite être comparée aux débits d'exploitation actuels et à la demande en eau future.

Les modèles d'écoulements souterrains calibrés issus du programme MODFLOW-2005 ont été couplés à l'outil d'optimisation PEST-OPT (White et coll., 2018). L'approche prend en compte les incertitudes associées aux paramètres des modèles numériques et aux observations pour attribuer une probabilité de contamination des puits en fonction des débits de pompage. L'effet des changements climatiques a été considéré dans les simulations par l'intermédiaire de deux paramètres : la recharge et le niveau moyen de la mer. Ces simulations sont désignées sous le terme « simulations d'exploitation durable ».

Ce terme sous-entend que les simulations s'appliquent au réseau de pompage actuellement en place et considèrent les effets des changements climatiques. Une description détaillée de l'approche est présentée à l'Annexe 12 et par Coulon et coll. (2022).

### **7.5.2.3 Détermination des aires d'alimentation des aquifères à haut potentiel d'exploitation**

Il est possible que dans le futur, d'autres puits d'alimentations doivent être aménagés dans de nouveaux secteurs, en cas de besoin en eau supplémentaire ou d'abandon de puits actuels. Il serait donc d'intérêt d'assurer la protection d'un territoire plus vaste que les seules aires d'alimentation des puits actuellement en opération, tel qu'il est présentement prescrit par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2). À partir des modèles d'écoulement souterrain et à l'aide du module de traçage de particules MODPATH, l'aire d'alimentation des aquifères à potentiel d'exploitation moyen à très élevé a été déterminée (Section 9.1.3). Pour ce faire, les lignes d'écoulement ont été tracées, c'est-à-dire le parcours de l'eau depuis son entrée (recharge) vers sa sortie (résurgences sur terre ou en mer), et l'ensemble des territoires alimentant les aquifères au potentiel d'exploitable moyen à très élevé, identifiés à la Section 8.2.5, ont été délimités.

## **7.6 Limites des modèles**

Les modèles numériques sont des outils puissants, mais les incertitudes associées aux résultats qu'ils fournissent dépendent de plusieurs facteurs, dont le programme utilisé, les hypothèses simplificatrices de modélisation et la quantité et la qualité des données intégrées au modèle. Dans le cas présent, deux sources d'incertitudes liées au programme MODFLOW-2005 et à l'outil d'optimisation PEST-OPT sont à souligner.

L'utilisation du module SWI2 impose l'usage de la version MODFLOW-2005, pour laquelle le raffinement des mailles autour des points d'intérêt n'est pas possible. Un pompage municipal est donc représenté par un flux extrait d'une maille de 20 m sur 20 m, et le rabattement sur ces mailles est très faible par rapport au rabattement induit par le pompage dans un maillage qui aurait été raffiné. La correction appliquée avec le module MNW2 sur ces mailles permet de simuler un rabattement plus réaliste, mais celui-ci reste sous-estimé dans la grande majorité des puits (Annexe 11).

Enfin, les modèles ont d'abord été conçus pour dresser un portrait régional des ressources en eau souterraine de l'archipel, notamment pour produire la carte piézométrique, évaluer l'épaisseur de la lentille d'eau douce et cartographier l'aire d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à élevé. Toutefois, les modèles ont également été utilisés pour estimer la quantité d'eau qu'il serait possible d'exploiter de manière durable à partir des puits municipaux actuels, ainsi que pour évaluer si la remontée de l'interface sous les puits a atteint le régime permanent. Étant donné que les détails de construction des puits et les conditions spécifiques à proximité des puits n'ont pas été considérés, et compte tenu des simplifications du modèle (interface abrupte, maillage grossier), les résultats concernant les puits municipaux doivent être considérés comme des tendances et non comme des valeurs précises. Par exemple, le modèle permet d'évaluer si le réseau peut fournir une plus grande quantité d'eau, quels puits ont un risque de salinisation plus élevé, et si le débit est bien distribué entre les puits. Toutefois, un modèle numérique à l'échelle locale considérant les spécificités des puits et ayant un maillage raffiné du secteur considéré devrait être utilisé afin de sélectionner de manière précise des débits de pompage et évaluer les risques spécifiques d'intrusion d'eau salée. Néanmoins, les résultats issus du modèle régional

présenté dans cette étude permettent de cibler les secteurs les plus sensibles qui devraient faire l'objet d'un suivi particulier.

## 8 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

### 8.1 Propriétés hydrauliques

#### 8.1.1 Conductivité hydraulique, transmissivité, emmagasinement et capacité spécifique

La connaissance des propriétés hydrauliques des matériaux géologiques est importante afin d'évaluer le potentiel d'exploitation des aquifères ainsi que pour la réalisation d'analyses quantitatives en lien avec les eaux souterraines. Dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, les propriétés hydrauliques suivantes ont été renseignées dans la base de données hydrogéologiques :

- la conductivité hydraulique ( $K$ );
- la transmissivité ( $T$ );
- le coefficient d'emmagasinement ( $S$ );
- l'emmagasinement spécifique ( $S_s$ );
- la capacité spécifique ( $C_{sp}$ ).

Ces données proviennent de plusieurs rapports d'étude consultés pour lesquelles des résultats d'analyse d'essais hydrauliques étaient disponibles, ainsi que des essais de perméabilité effectués dans les puits visités par l'Université Laval (Section 4.2.2). En tout, 991 observations d'essais hydrauliques sont compilées dans la base de données hydrogéologiques (Tableau 4.4 de la Section 4.3.1.2). Le Tableau 8.1 informe sur le nombre de mesures associées à ces essais hydrauliques pour chaque type de propriété et le nombre de puits concernés par ces mesures. À noter que pour un même puits, des valeurs de plusieurs types de propriétés, et aussi plusieurs mesures pour un même type de propriété, sont parfois disponibles. Au total, les mesures sont réparties dans 282 puits différents, et ce dans toutes les unités géologiques, sauf les dunes de sable et les dykes et stocks de gabbro.

**Tableau 8.1 : Nombre de mesures de propriétés hydrauliques compilées dans la base de données hydrogéologiques et nombre de puits concernés**

Propriété hydraulique	Nombre de mesures	Nombre de puits
Conductivité hydraulique ( $K$ )	668	207
Transmissivité ( $T$ )	224	140
Coefficient d'emmagasinement ( $S$ )	72	52
Emmagasinement spécifique ( $S_s$ )	169	19
Capacité spécifique ( $C_{sp}$ )	61	39

Pour l'analyse statistique des propriétés hydrauliques, une seule mesure par puits a été sélectionnée, selon la méthodologie détaillée à l'Annexe 13. Lorsque possible, les transmissivités ont été transformées en conductivités hydrauliques, car elles sont davantage appropriées pour l'étude de la variation spatiale de la capacité des aquifères à permettre l'écoulement. Aussi, le plus grand nombre de points de mesure de la conductivité hydraulique est nécessaire pour les besoins de la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine. Les capacités spécifiques, représentatives des puits et non des

caractéristiques intrinsèques de l'aquifère, n'ont pas été retenues pour l'analyse statistique. Au final, les mesures provenant de 197 points de mesure, localisés à la Figure 8.1, ont été conservées pour la conductivité hydraulique, le coefficient d'emmagasinement et l'emmagasinement spécifique. Le Tableau 8.2 présente le sommaire des statistiques des mesures retenues pour chacune des unités géologiques.

On retrouve le plus grand nombre de mesures de conductivité hydraulique, 77 %, dans les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, car beaucoup d'études ont été réalisées dans cette unité géologique qui constitue l'aquifère principal des îles de la Madeleine. Le Membre de l'Étang-du-Nord est la deuxième unité géologique la plus étudiée, avec 17 % des points de mesure de conductivité hydraulique. La combinaison des autres unités géologiques ne compte que pour 6 % des points de mesure. On retrouve aussi le plus de mesures de coefficients d'emmagasinement et d'emmagasinement spécifiques dans le Membre de l'Étang-des-Caps, dans des proportions similaires aux conductivités hydrauliques, mais en nombre plus limité.

La répartition des mesures est aussi inégale d'une île à l'autre. La plupart des points de mesures, soit 56 %, proviennent de l'île du Cap aux Meules, suivi dans l'ordre par 20 % sur l'île de la Grande Entrée, 9 % pour la Grosse Île et l'île du Havre aux Maisons, chacune, et 6 % pour l'île du Havre Aubert. Un seul point de mesure est observé sur l'île d'Entrée et aucun pour l'île aux Loups. Conséquemment, les propriétés hydrauliques ne sont pas représentées équitablement pour chacune des îles, mais il est supposé que, pour une même unité géologique, elles sont similaires d'une île à l'autre.

Une relation entre la conductivité hydraulique et les unités géologiques semble se dégager des observations. Les grès du Membre de l'Étang-des-Caps sont l'unité géologique la plus perméable de l'archipel (outre les dunes de sable pour lesquels aucune mesure n'est disponible), avec des conductivités hydrauliques dans l'ordre de grandeur de  $1 \times 10^{-5}$  à  $1 \times 10^{-4}$  m/s. Les roches sédimentaires du Membre de l'Étang-du-Nord semblent un peu moins perméables, avec des valeurs dans l'ordre de grandeur de  $1 \times 10^{-6}$  à  $1 \times 10^{-5}$  m/s. Les basaltes de la Formation du Cap au Diable, qui forment les buttes centrales des îles, présentent les conductivités hydrauliques les plus faibles, et constituent donc l'unité géologique la moins perméable (outre l'unité des dykes et stocks de gabbro pour laquelle aucune mesure n'est disponible). Elle ne peut toutefois pas être qualifiée d'imperméable, avec des mesures dans l'ordre de grandeur de  $1 \times 10^{-6}$  m/s. La fracturation dans ces roches volcaniques permet ainsi un écoulement non négligeable de l'eau souterraine. Seules deux mesures sont disponibles pour les brèches de la Formation du Havre aux Maisons, qui semble présenter la conductivité hydraulique la plus élevée, mais ces mesures ne sont pas en nombre suffisant et possiblement pas représentatives de la perméabilité de cette formation qui, d'après la nature des roches qui la composent, est probablement beaucoup plus faible. D'ailleurs, Dessureault et Simard (1970) n'ont pu obtenir des débits satisfaisants pour des puits aménagés dans cette unité géologique. Enfin, les quatre mesures dans les dépôts meubles chenalisés, toutes de l'île de la Grande Entrée, montrent une grande variabilité, tel qu'il est attendu dans ce type de dépôts hétérogènes contenant du sable fin et parfois du sable plus grossier jusqu'à des graviers. La conductivité hydraulique moyenne d'environ  $1 \times 10^{-5}$  m/s est similaire à celles du Membre de l'Étang-du-Nord, donc un peu plus faible que celle du Membre de l'Étang-des-Caps.

Pour les autres propriétés hydrauliques, puisque peu de données autres que dans le Membre de l'Étang-des-Caps sont disponibles, aucune tendance ne semble se dégager entre les unités géologiques. On observe toutefois une grande variabilité dans les grès du Membre de l'Étang-des-Caps pour les

coefficients d'emmagasinement et les emmagasineurs spécifiques, de trois à quatre ordres de grandeur, suggérant une hétérogénéité dans le potentiel de mobilisation de l'eau dans l'aquifère qui diffère selon les localisations ou la profondeur, probablement en fonction de la connectivité des pores et du degré de cimentation variable des grès.

**Tableau 8.2 : Sommaire des statistiques des propriétés hydrauliques par unité géologique**

Unité géologique	Conductivité hydraulique (K)			Coefficient d'emmagasinement (S)			Emmagasinement spécifique (S <sub>s</sub> )		
	<i>n</i>	$\mu$	$\sigma_{log}$	<i>n</i>	$\mu$	$\sigma_{log}$	<i>n</i>	$\mu$	$\sigma_{log}$
	(-)	(m/s)	(log m/s)	(-)	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	(log m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	(-)	(m <sup>-1</sup> )	(log m <sup>-1</sup> )
Membre de l'Étang-des-Caps	152	$5,95 \times 10^{-5}$	0,55	44	$1,42 \times 10^{-3}$	1,12	9	$1,55 \times 10^{-5}$	1,00
Membre de l'Étang-du-Nord	33	$1,97 \times 10^{-5}$	0,83	6	$1,28 \times 10^{-3}$	0,95	1	$2,59 \times 10^{-6}$	-
Formation du Cap au Diable	6	$4,73 \times 10^{-6}$	0,66	3	$6,75 \times 10^{-4}$	0,37	2	$4,54 \times 10^{-6}$	1,20
Formation du Havre aux Maisons	2	$1,88 \times 10^{-4}$ <sup>a</sup>	0,98	1	$5,40 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
Dépôts meubles chenalisés	4	$1,48 \times 10^{-5}$	0,90	-	-	-	-	-	-

*n* = nombre de données dans l'échantillon ;  $\mu$  = moyenne ;  $\sigma_{log}$  = écart-type du logarithme des valeurs

<sup>a</sup> Seules deux mesures sont disponibles pour la Formation du Havre aux Maisons, qui semble présenter la conductivité hydraulique la plus élevée, mais ces mesures ne sont pas en nombre suffisant et possiblement pas représentatives de la perméabilité de cette formation qui, d'après la nature des roches qui la composent, est probablement beaucoup plus faible.

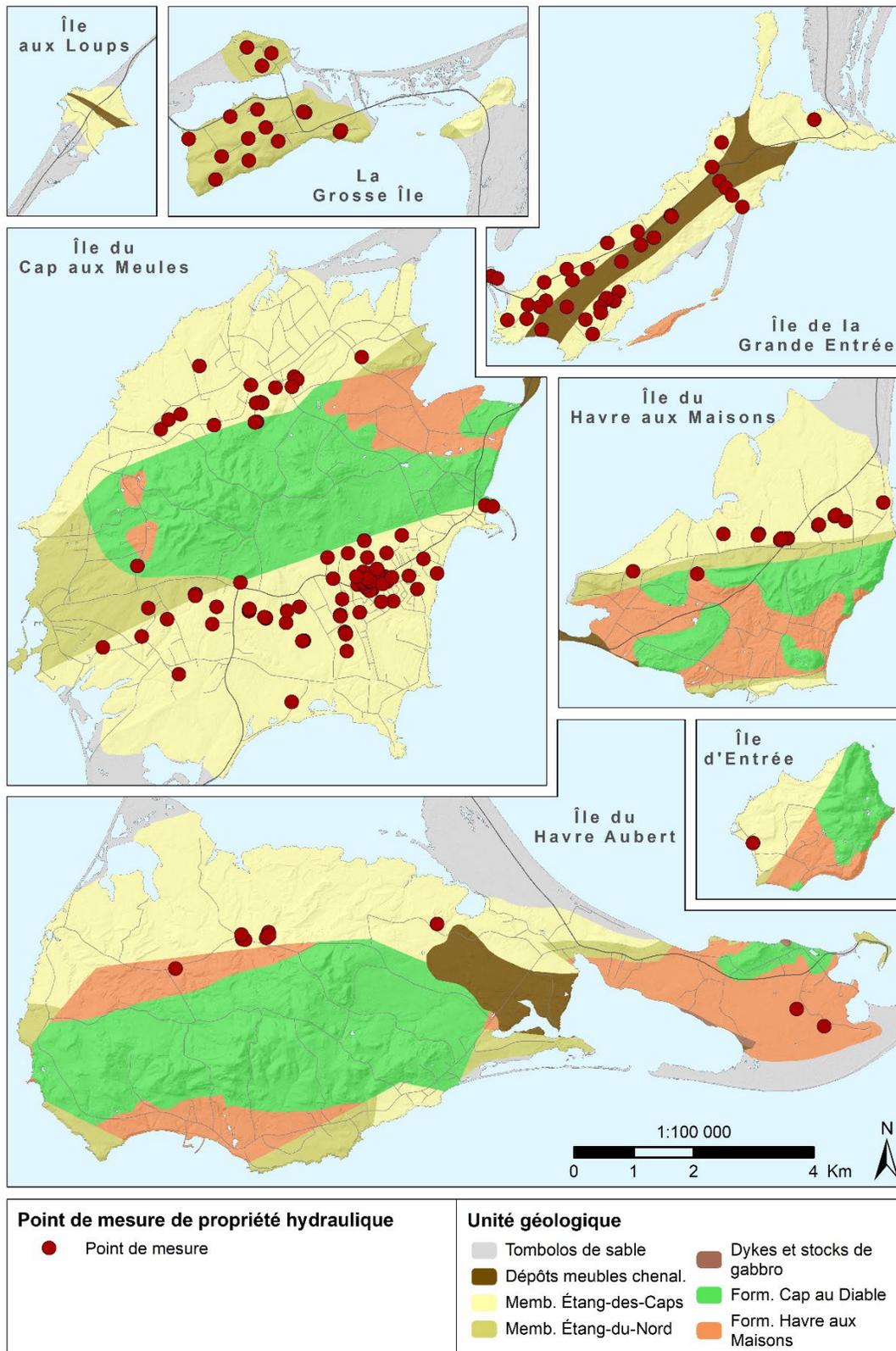
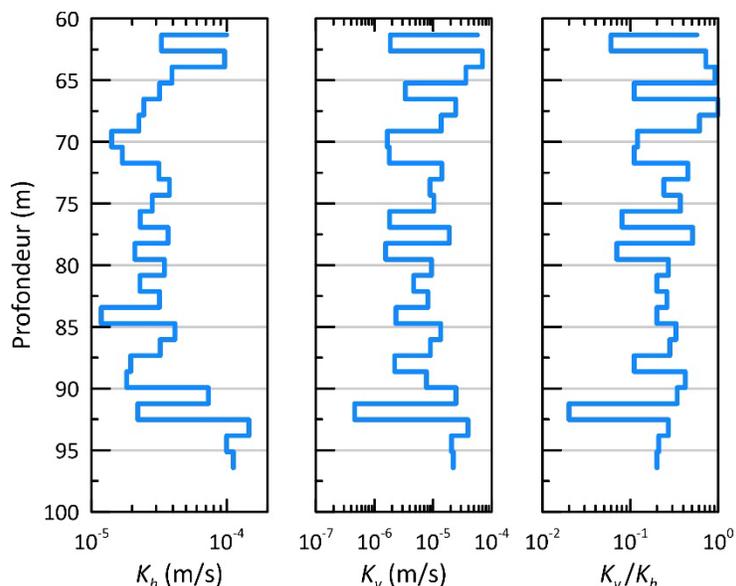


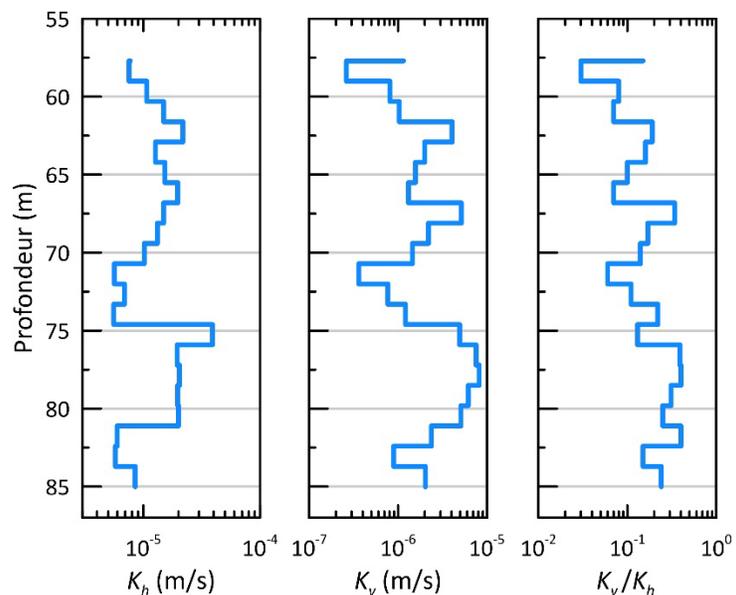
Figure 8.1 : Localisation des points de mesures des propriétés hydrauliques

Les résultats des essais de perméabilité multi-niveaux réalisés dans les parties ouvertes au roc des puits F-1 et F-2 du RSESQ sur l'île de la Grande Entrée (Section 4.2.2.1 – localisation à la Figure 5.23) permettent d'évaluer l'homogénéité en profondeur de la conductivité hydraulique des grès du Membre de l'Étang-des-Caps. Les Figure 8.2 et Figure 8.3 montrent les profils des valeurs obtenues pour les conductivités hydrauliques horizontale et verticale, ainsi que pour l'anisotropie. Les conductivités hydrauliques horizontales varient sur environ un ordre de grandeur dans les deux puits ( $1 \times 10^{-5}$  à  $1 \times 10^{-4}$  m/s), alors que les conductivités hydrauliques verticales varient sur deux ordres de grandeur ( $1 \times 10^{-7}$  à  $1 \times 10^{-5}$  m/s). Ainsi, l'écoulement horizontal est plus important que l'écoulement vertical, tel qu'il est fréquemment observé dans des contextes sédimentaires. D'ailleurs, les valeurs d'anisotropie combinant les essais des deux puits varient entre 0,0 et 1,0, avec une médiane de 0,2.

Pour l'ensemble des paramètres et pour les deux puits, il ne semble pas y avoir de tendance verticale. Les propriétés hydrauliques du roc ne semblent donc pas affectées par la profondeur, mais plutôt par les hétérogénéités locales.



**Figure 8.2 : Profils de la conductivité hydraulique horizontale ( $K_h$ ), de la conductivité hydraulique verticale ( $K_v$ ) et de l'anisotropie ( $K_v/K_h$ ) dans la portion ouverte au roc du puits F-1**



**Figure 8.3 : Profils de la conductivité hydraulique horizontale ( $K_h$ ), de la conductivité hydraulique verticale ( $K_v$ ) et de l'anisotropie ( $K_v/K_h$ ) dans la portion ouverte au roc du puits F-2**

### 8.1.2 Porosité

Aucune valeur de porosité totale et de drainage n'a été compilée dans la base de données hydrogéologiques. Ces valeurs sont rarement mesurées, car cela nécessite de prélever des échantillons du milieu géologique, souvent lors du forage d'un puits, et faire des tests en laboratoire, ce qui s'avère un processus coûteux. Dans la plupart des cas, des valeurs issues de la littérature sont employées dans les études hydrogéologiques. Aux îles de la Madeleine, quelques mesures sont disponibles pour les grès

du Membre de l'Étang-des-Caps seulement. Pour les autres unités géologiques, des valeurs issues de la littérature doivent être sélectionnées selon leur lithologie. Les valeurs de porosité totale et de porosité de drainage retenues, pour chaque unité géologique, à utiliser dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, sont présentées au Tableau 8.3.

**Tableau 8.3 : Valeurs de porosité totale et de porosité de drainage retenue pour chaque unité géologique**

Unité géologique	Lithologie	Porosité totale		Porosité de drainage	
		Variation des valeurs de la littérature*	Valeur retenue	Variation des valeurs de la littérature*	Valeur retenue
Tomboles de sable	Sable fin homogène	25-53 %	40 %	10-30%	30 %
Dépôts meubles chenalisés	Sable fin non homogène	20-53 %	30 %	10-30%	22 %
Membre de l'Étang-des-Caps	Grès de siltstones à laminations obliques géantes	3,5-49 %	30 %	10-40%	22 %
Membre de l'Étang-du-Nord	Grès, siltstones, mudstones, conglomérats et calcaires	n.d.	20 %	n.d.	15 %
Dykes et stocks de gabbro	Dykes et stocks de gabbro	n.d.	1 %	n.d.	0,5 %
Formation du Cap au Diable	Basaltes, roches pyroclastiques, calcaire cristallin	1-50%	10 %	n.d.	5 %
Formation de Havre-aux-Maisons	Brèche d'effondrement, mudstones, grès, siltstones, calcaires, dolomies, gypse, anhydrite, basaltes, fossiles, albâtres, roches volcanoclastiques	n.d.	10 %	n.d.	5 %

\* Sources : Johnson et Morris (1962); Morris et Johnson (1967); Davis (1969); Freeze et Cherry (1979); Croff et coll. (1985); Fetter (2001); Borden (2006); Therrien (2010)

### 8.1.2.1 Porosité totale

Des analyses en laboratoire d'une dizaine d'échantillons de grès du Membre de l'Étang-des-Caps ont été effectuées par Gélinas et Choquette (1996). Les échantillons ont été prélevés à différentes profondeurs et proviennent tous du site de la centrale thermique de Cap-aux-Meules. La porosité totale mesurée varie entre 28 et 32 %. Les échantillons récoltés dans les 10 premiers mètres depuis la surface ont une porosité légèrement supérieure. Cette différence serait attribuable à la dissolution du ciment du grès par l'eau d'infiltration qui se charge en silice depuis la surface du terrain jusqu'au niveau de la nappe (Gélinas et Choquette, 1996).

Des mesures provenant d'un seul site engendrent un doute sur leur représentativité à l'échelle de l'archipel. Une comparaison avec des valeurs dérivées autrement, même de manière indirecte, ainsi que des valeurs provenant de l'extérieur du territoire d'étude, mais dans un contexte hydrogéologique similaire, semble d'intérêt. La porosité totale a pu être estimée, à l'aide du programme HydrogeoSieveXL (Devlin, 2014), des analyses granulométriques de 11 échantillons de grès du Membre de l'Étang-des-Caps et de 10 échantillons de grès du Membre de l'Étang-du-Nord récoltés par Brisebois (1981). Des

valeurs respectives moyennes de 41 et 42 % ont été obtenues, soit plus élevées que les mesures de Gélinas et Choquette (1996). Paradis et coll. (2016) ont estimé la porosité totale d'une formation de grès de l'Île du Prince-Édouard, du même sous bassin sédimentaire Madeleine, à 17 %, soit plus faible que les mesures de Gélinas et Choquette (1996). Pour les besoins de l'étude actuelle, la porosité totale médiane de 30 % des mesures de Gélinas et Choquette (1996) a été retenue pour les grès du Membre de l'Étang-des-Caps (Tableau 8.3).

Une valeur de porosité totale de 30 % est élevée pour un aquifère de roc, même pour du grès. Elle correspond à la borne supérieure des plages de porosité pour une telle unité rocheuse considérées par plusieurs auteurs (Johnson et Morris, 1962; Davis, 1969; Freeze et Cherry, 1979; Borden, 2006). L'uniformité des grains de sable d'origine éolienne et le faible degré de cimentation des grains arrondis (Figure 5.13 de la Section 5.1.1.2) font en sorte que la porosité primaire (intergranulaire) est prépondérante sur la porosité secondaire (de fracturation).

Les porosités totales des autres unités géologiques ont été choisies en combinant des valeurs proposées par la littérature et le jugement professionnel issu de l'ensemble des connaissances du contexte hydrogéologique des îles de la Madeleine. La littérature ne proposant que des valeurs pour des types de rocs distincts, il n'est pas possible d'attribuer une plage de valeur pour les amalgames de roches du Membre de l'Étang-du-Nord et de la Formation du Havre aux Maisons. Somme toute, les roches comme le calcaire, les siltstones et mudstones peuvent avoir une porosité totale beaucoup plus faible que le grès. Ainsi, pour les roches sédimentaires du Membre de l'Étang-du-Nord, une valeur de 20 %, soit un tiers plus faible que celle du Membre de l'Étang-des-Caps, a été retenue (Tableau 8.3). Parmi les autres unités rocheuses, seuls les basaltes du Cap au Diable ont des valeurs proposées par la littérature, mais celles-ci sont extrêmement variables et dépendent principalement du degré de fracturation de la roche. Les observations de surface sur le terrain montrent une fracturation intensive, mais causée par les aléas météorologiques. La connaissance de ce degré de fracturation en profondeur étant restreinte, une valeur de 10 %, soit deux tiers plus faibles que celle du Membre de l'Étang-des-Caps, a été choisie. La même valeur a été appliquée aux brèches de la Formation du Havre aux Maisons, à défaut de plus de connaissances. Pour les dykes et stocks de gabbro, ces roches étant très massives, une valeur faible de 1 % a été retenue. Les dunes de sable sont constituées de sable fin homogène généralement lâche. Une porosité totale élevée de 40 % a été retenue. Les dépôts meubles chenalisés sont composés de sable fin hétérogène et probablement plus dense en profondeur. La valeur de 30 % similaire au grès du Membre de l'Étang-des-Caps a été choisie.

#### **8.1.2.2 Porosité de drainage**

Les essais en laboratoire de Gélinas et Choquette (1996) ont permis de déterminer, pour quatre échantillons, des courbes de rétention en eau à partir desquelles la teneur en eau résiduelle peut être tirée (Figure 8.4). Une valeur moyenne de 8 % a été obtenue (au potentiel matriciel à -100 kPa). La différence entre la porosité totale (à saturation) de 30 % et la teneur en eau résiduelle donne la valeur de la porosité de drainage (*specific yield*) de 22 %, qui représente la proportion de l'eau extractible du milieu.

Le programme HydroGeoSieveXL (Devlin, 2014) a aussi permis d'estimer, à l'aide de la méthode de Urumović et Urumović (2016), une porosité cinématique (*effective porosity*) moyenne de 27 % à partir des analyses granulométriques des échantillons de Brisebois (1981). Cette porosité est différente de la

porosité de drainage, car elle correspond plutôt au rapport du volume des pores actifs parcourus par l'eau en mouvement au volume total du milieu. Elle est semblable à la porosité de drainage pour un échantillon de sable uniforme, mais peut être significativement plus faible lorsque l'échantillon contient une part accrue des particules plus fines (Urumović et Urumović, 2016). Le grès du Membre de l'Étang-des-Caps contenant des grains relativement uniformes, il est raisonnable d'estimer que les porosités de drainage et cinématique y sont similaires. Ainsi, la valeur de 27 % est comparable à la valeur de 22 % de Gélinas et Choquette (1996). Cette dernière, puisque mesurée donc plus fiable, est retenue dans le cadre de l'étude actuelle (Tableau 8.3).

Puisqu'aucune valeur de porosité de drainage pour l'amalgame de roche du Membre de l'Étang-du-Nord n'est proposée dans la littérature, le même rapport entre la porosité de drainage et la porosité totale que celui des grès du Membre de l'Étang-des-Caps a été utilisé (Tableau 8.3). Ce rapport étant d'environ 75 %, une valeur de 15 % a été retenue. La même méthode a été employée pour les dépôts chenalisés et les tombolos de sable, ce qui donne des valeurs retenues de 22 % et 30 %, respectivement. Les autres unités rocheuses étant moins poreuses, et la porosité dépendant plus des fractures que des espaces vides entre les grains probablement moins connectés entre eux, un rapport de 50 % sur la porosité totale a été calculé, ce qui résulte en des porosités de drainage retenues de 5 %, 5 % et 0,5 % respectivement pour les formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons, et les dykes et stocks de gabbro.

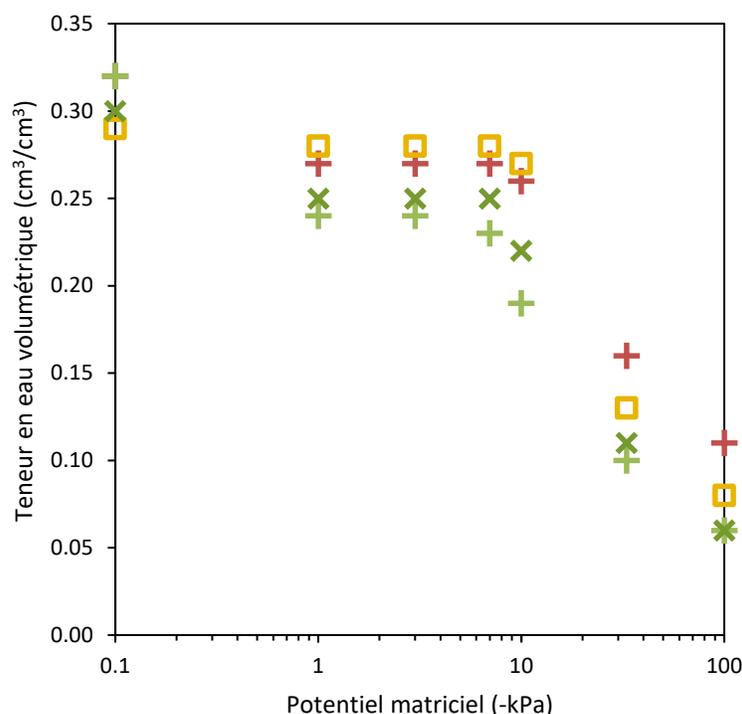


Figure 8.4 : Courbes de rétention en eau de quatre échantillons de grès du Membre de l'Étang-des-Caps (tiré de Gélinas et Choquette, 1996)

## 8.2 Formations aquifères

Aux îles de la Madeleine, le potentiel d'exploitation des eaux souterraines est traditionnellement évalué par unité géologique en les considérant comme des formations aquifères. Dans cette section, chacune de ces formations aquifères est présentée en détail et leur potentiel d'exploitation est évalué selon leurs propriétés hydrauliques, leur épaisseur, leur étendue et l'épaisseur de la lentille d'eau douce qu'elles contiennent. Cette description est suivie d'un tableau et d'une carte synthèse.

### 8.2.1 Formation du Cap aux Meules

La Formation du Cap aux Meules constitue la principale formation aquifère de l'archipel. C'est d'ailleurs dans cette formation aquifère que l'ensemble des puits municipaux ont été aménagés. Cette formation aquifère représente un peu plus du tiers de la superficie de l'Archipel. Selon la compilation des données effectuées dans le cadre de cette étude, le Membre de l'Étang-des-Caps a une conductivité hydraulique moyenne légèrement supérieure à celle du Membre de l'Étang-du-Nord ( $6 \times 10^{-5}$  m/s et  $2 \times 10^{-5}$  m/s, respectivement). Toutefois, les études antérieures attribuent généralement un potentiel aquifère nettement plus élevé au Membre de l'Étang-des-Caps (ex. : Sylvestre, 1979b). Cela pourrait être expliqué par le fait que l'écart-type des valeurs de conductivité hydraulique est plus grand pour le Membre de l'Étang-du-Nord que pour le Membre de l'Étang-des-Caps (voir Tableau 8.2). Ainsi, le débit exploitable des puits aménagés dans cette unité géologique pourrait être plus variable que celui obtenu dans le Membre de l'Étang-des-Caps. Cette variabilité pourrait être logique. En effet, le Membre de l'Étang-des-Caps est composé presque uniquement de grès éoliens très perméables tandis que le Membre de l'Étang-du-Nord est composé d'une alternance de grès, de mudstone et conglomérat, ces deux dernières lithologies étant en général moins perméables que le grès.

L'épaisseur de la Formation du Cap aux Meules peut atteindre plus de 600 m, avec une épaisseur d'environ 300 m pour chacun des membres. Malgré cette épaisseur importante, seule une fraction est occupée par de l'eau douce. Celle-ci forme une lentille dont l'épaisseur peut atteindre près de 500 m près du centre de certaines îles, et diminue progressivement pour devenir nulle au-delà, mais relativement près, des côtes.

L'eau souterraine contenue dans les aquifères de ces unités géologiques est très vulnérable pour deux raisons bien différentes. Dans un premier temps, l'eau souterraine forme une nappe libre qui est alimentée directement par l'infiltration de l'eau à la surface du sol. Un contaminant pourrait donc aussi s'infiltrer dans le sol et rejoindre la nappe phréatique en percolant à travers les grès perméables. Dans un deuxième temps, ces unités géologiques sont généralement situées à proximité de la mer, ce qui les rend vulnérables à l'intrusion d'eau salée si les prélèvements sont trop importants.

### 8.2.2 Formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons

Le potentiel aquifère des Formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons est généralement considéré comme faible en raison de leur conductivité hydraulique plus faible que celle du Cap aux Meules. Toutefois, cette évaluation s'appuie sur un très faible nombre de données, compte tenu que les efforts de recherche en eau souterraine se sont toujours concentrés sur la Formation de Cap-aux-Meules.

La compilation des données de conductivité hydraulique disponible révèle une moyenne d'environ  $5 \times 10^{-6}$  m/s pour la Formation de Cap au Diable, soit à peine un ordre de grandeur inférieur au Membre de l'Étang-des-Caps. Toutefois, le calage des modèles hydrogéologiques suggère une valeur de conductivité hydraulique moyenne encore plus faible, soit de  $2 \times 10^{-7}$  m/s. Aussi, bien que cette unité géologique ne soit généralement pas considérée comme une formation aquifère, elle représente une source d'alimentation pour les résidences isolées et les exploitations agricoles. De plus, les propriétés hydrauliques des roches volcaniques sont reconnues pour être très variables, d'autant plus que cette unité géologique peut être localement très fracturée (Brisebois, 1981), un facteur qui contribue à augmenter la conductivité hydraulique des roches. Ainsi, la productivité des puits aménagés dans cette unité géologique est difficilement prévisible, et pourrait permettre de grands, comme de faibles prélèvements d'eau.

Pour la Formation du Havre aux Maisons, seules deux valeurs de conductivité hydraulique ont été compilées et celles-ci sont relativement élevées (moyenne de  $2 \times 10^{-4}$  m/s). Il est peu probable qu'elles soient réalistes compte tenu que Dessureault et Simard (1970) ont obtenu de très faibles débits de pompage dans les puits aménagés dans cette unité géologique, même s'ils ne rapportent pas de valeurs de conductivité hydraulique. La calibration du modèle hydrogéologique suggère des valeurs de l'ordre de  $1 \times 10^{-6}$  m/s.

Même si ces unités géologiques ne sont pas favorables à une exploitation importante, elles occupent presque le tiers du territoire de l'Archipel et sont abondamment exploitées par les résidents qui ne sont pas raccordés à l'aqueduc. Elles sont également très importantes pour les formations aquifères adjacentes pour qui elles représentent une source de réalimentation latérale. En effet, en raison de leur situation géographique au centre des îles et leur position en altitude, elles constituent en quelque sorte un immense château d'eau qui se déverse lentement dans les aquifères situés en aval hydraulique.

L'épaisseur de ces unités géologiques n'est pas connue avec précision, bien que des valeurs allant jusqu'à 150 m sont rapportées par Brisebois (1981) pour la Formation du Cap au Diable, et de plusieurs centaines de mètres pour la Formation du Havre aux Maisons. Selon les simulations numériques, l'épaisseur de la lentille d'eau douce est généralement supérieure à 500 m dans ces unités géologiques, bien qu'aucune mesure directe ou indirecte (géophysique) ne permette de le vérifier.

### **8.2.3 Dunes de sable**

Les dunes de sable représentent une formation aquifère en raison de leur conductivité hydraulique relativement élevée. Bien que cette unité géologique occupe environ un tiers du territoire de l'Archipel, la faible épaisseur de la lentille d'eau douce limite considérablement l'utilisation de l'eau souterraine qu'elles contiennent. Bien qu'aucune donnée de niveau d'eau n'ait été compilée ou mesurée dans cette unité géologique dans le cadre de ce projet, les résultats des simulations numériques suggèrent que la charge hydraulique dans cette unité est généralement inférieure à 1 m, et le plus souvent près de 0,4 m. En utilisant la relation de Ghyben-Herzberg, cela correspondrait à une épaisseur de la lentille d'eau douce d'une quarantaine de mètres, au maximum. Toutefois, il est plus réaliste de penser que son épaisseur soit bien moindre. Ainsi, ces ressources pourraient représenter une source d'eau potable pour les résidences isolées situées sur les cordons dunaires, pourvu que ces puits soient peu profonds et qu'ils prélèvent un faible débit. On dénombre d'ailleurs de nombreux puits domestiques dans ce milieu.

Des prélèvements plus importants peuvent être envisagés, comme le démontre le cas de la Mine Seleine. En effet, un prélèvement de 17 m<sup>3</sup>/j est effectué afin d'alimenter les douches et les toilettes de la mine, ainsi que pour le nettoyage d'équipements sous terre, et ce à l'aide 6 puits de pompage de 3 m de profondeur situés dans les dunes de sable à proximité de la mine (Section 6.2.5.1 pour les détails). Évidemment, ce type d'aquifère est très vulnérable à la contamination par les activités de surface ainsi qu'à l'intrusion d'eau salée.

#### **8.2.4 Dépôts chenalisés**

Ces dépôts sont relativement peu abondants sur l'archipel (3 % de la superficie totale). Ils se retrouvent principalement dans une vallée glaciaire située sur l'Île de la Grande Entrée et sont composés principalement de sable fin. La conductivité hydraulique moyenne des dépôts de cette unité géologique est de  $1 \times 10^{-5}$  m/s, soit une valeur assez élevée qui en fait formation aquifère intéressante. Sur l'île de la Grande Entrée, l'épaisseur des dépôts peut atteindre près de 100 m localement, mais diminue rapidement près des côtes. Toujours sur cette île, ces dépôts contiennent une lentille d'eau douce dont l'épaisseur maximale peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les eaux souterraines dans ces dépôts forment également une nappe libre très vulnérable à la contamination par les activités de surface, ainsi qu'à l'intrusion d'eau salée.

#### **8.2.5 Potentiel d'exploitation des formations aquifères**

Le Tableau 8.4 présente une synthèse des principales caractéristiques des formations aquifères. Tel que mentionné ci-haut, le Membre de l'Étang-des-Caps de la Formation du Cap aux Meules présente le meilleur potentiel d'exploitation suivi du Membre de l'Étang-du-Nord. Les dépôts chenalisés ont un potentiel d'exploitation élevé, mais comme leur étendue est faible, un potentiel d'exploitation moyen a été retenu. Enfin, les dunes de sable et les formations du Cap au Diable et Havre aux Maisons ont un potentiel d'exploitation faible. La Carte 20 : Limites des aquifères, potentiel d'exploitation et coupes hydrogéologiques, en annexe électronique, ainsi que la Figure 8.5, illustrent la synthèse du potentiel d'exploitation des aquifères. Les aquifères au potentiel moyen à très élevé y sont regroupés sous le même thème, puisque ce sont ceux-ci qui sont d'intérêt pour l'exploitation de la ressource en eau souterraine des îles de la Madeleine. À noter que les coupes hydrogéologiques qui sont présentées sur la Carte 20 seront abordées à la Section 8.7 de ce rapport.

**Tableau 8.4 : Synthèse des principales caractéristiques des formations aquifères de l'archipel**

Formation	Membre	Lithologie	Épaisseur (m)	Superficie (%)	Conductivité hydraulique (m/s)	Porosité (%)		Épaisseur lentille	Potentiel d'exploitation
						totale	de drainage		
-	-	Dunes de sable	0 - 15+	32		40	30	Faible	Faible
-	-	Dépôts chenalisés	0 - 100	3	$1,5 \times 10^{-5}$	30	22	Moyenne	Moyen
Cap aux Meules	Étang-des-Caps	Grès éoliens	300+	30	$6,0 \times 10^{-5}$	30	22	Élevée	Très élevé
	Étang-du-Nord	Grès, siltstones et mudstones	300+	7	$2,0 \times 10^{-5}$	20	15	Élevée	Élevé
Cap au Diable	-	Roches volcaniques	150+	19	$4,7 \times 10^{-6}$	10	5	Élevée	Faible
Havre aux Maisons	-	Brèches, terrigènes, calcaires, évaporites	150+	9	$1,2 \times 10^{-6}$ <sup>a</sup>	10	5	Élevée	Faible

<sup>a</sup> Cette valeur correspond à la moyenne des conductivités hydrauliques calibrées des modèles hydrogéologiques.

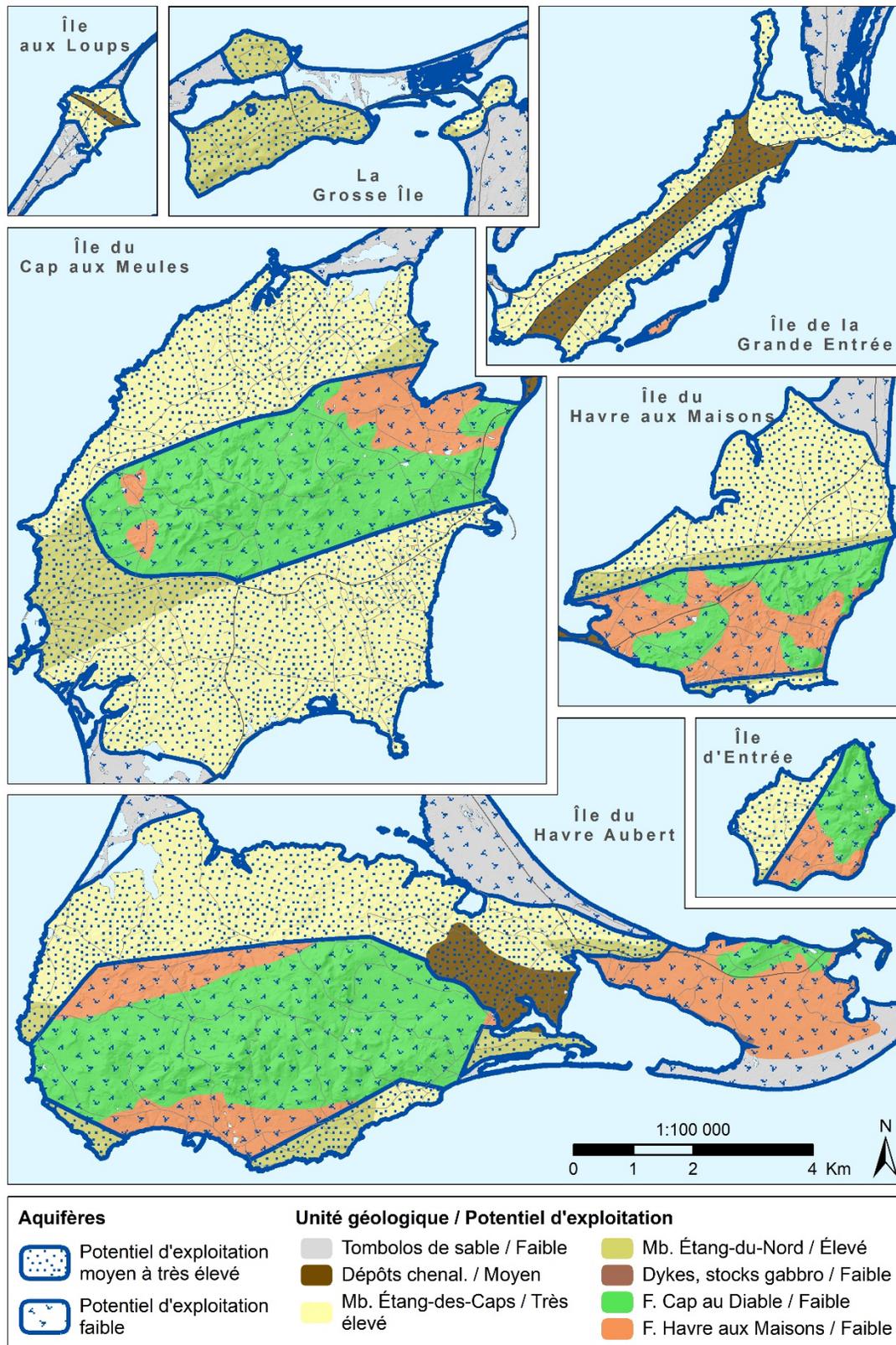


Figure 8.5 : Limites et potentiel d'exploitation des aquifères

## 8.3 Cartographie et disponibilité de l'eau souterraine

### 8.3.1 Piézométrie

La surface piézométrique a été obtenue par modélisation hydrogéologique, calibrée à l'aide des niveaux d'eau mesurés dans les puits d'observation de la base de données hydrogéologiques. Aux îles de la Madeleine, les aquifères de dépôts meubles sont rares et sont en lien hydraulique avec l'aquifère de roc. Ainsi, une seule surface piézométrique, représentative de ces deux types d'aquifères, a été calculée. Un processus rigoureux de validation et de sélection des données a d'abord été appliqué afin d'identifier les données de niveau d'eau à utiliser. Cette méthodologie est décrite en détail à l'Annexe 14. Ce processus tient compte de la cohérence de la localisation des puits et des différentes informations disponibles sur les niveaux d'eau, dont notamment leur représentativité à un niveau statique. D'autres critères basés sur le jugement professionnel, dont certaines analyses statistiques, ont permis d'identifier les données douteuses qui ont été comparées visuellement à leurs voisins immédiats avant d'être éliminées. Les données moins fiables du SIH ont bénéficié du même processus de validation et ont été ajoutées aux précédentes pour accroître le nombre de mesures dans les secteurs où la densité de puits était très faible, notamment au nord et à l'ouest de l'île du Cap aux Meules, au sud de l'île du Havre aux Maisons et à l'est de l'île du Havre Aubert. Au terme du processus de validation, sur les 729 puits avec au moins une mesure de niveau d'eau contenue dans la base de données hydrogéologiques, 344 ont été conservés pour la modélisation de la piézométrie.

Puisque les niveaux d'eau de la base de données hydrogéologiques sont exprimés en profondeur d'eau dans les puits, ils ont dû être transformés en élévation, en soustrayant la profondeur par l'élévation du sol du MAN (Carte 5), pour être intégrés au modèle numérique. Les observations de niveau d'eau utilisées dans le processus de modélisation sont localisées à la Figure 8.6. Peu d'information est disponible sur les buttes centrales des îles, ce qui tend à augmenter l'incertitude des résultats dans ces secteurs. Par contre, sur les plateaux de grès, où l'on retrouve la majorité des puits sur l'archipel, la densité des observations est raisonnablement élevée, conférant une meilleure certitude aux résultats. La majeure partie de l'île du Havre Aubert (excluant le secteur de La Grave) fait exception, car on y retrouve qu'une quinzaine d'observations de niveau d'eau. Le processus de calibration permet de s'assurer que la piézométrie modélisée correspond bien à la piézométrie aux points d'observation (Section 7.5.1 et Annexe 11). Malgré la répartition spatialement hétérogène des niveaux d'eau observés sur le territoire, la cohérence des modèles calibrés indépendamment est un bon indice d'une représentation réaliste du territoire.

Les sous-sections qui suivent présentent les résultats des modèles calibrés à l'aide des observations piézométriques. L'élévation de la surface libre de la nappe, les gradients hydrauliques horizontaux qu'on peut en tirer, et la profondeur à la nappe sont présentés dans l'ordre. Suivent ensuite une présentation des suivis piézométriques effectués dans les puits d'observation aux îles de la Madeleine et une explication sur l'effet de la marée sur les élévations piézométriques.

#### 8.3.1.1 Élévation de la surface libre de la nappe

La Carte 21 : Piézométrie, en annexe électronique, et la Figure 8.6 présentent, sur une grille régulière de 20 m par 20 m, les élévations de la charge hydraulique de l'eau souterraine par rapport au niveau moyen local de la mer. En condition de nappe libre, comme c'est le cas partout sur l'archipel, l'élévation

de la charge hydraulique correspond à l'élévation de la surface libre de la nappe d'eau douce. Puisque l'eau souterraine s'écoule des niveaux piézométriques élevés vers les niveaux piézométriques faibles, perpendiculairement aux isopièzes (courbe de même niveau piézométrique), la carte piézométrique permet d'interpréter les directions d'écoulement.

La surface piézométrique modélisée (Figure 8.6) s'apparente à une reproduction adoucie de la topographie du sol. Elle oscille entre 0 et 90 m pour l'ensemble de l'archipel. Tout comme l'élévation du sol, la surface libre de la nappe est la plus élevée au niveau des buttes du centre des îles, incluant les roches sédimentaires du Membre de l'Étang-du-Nord, avec des pentes abruptes. La surface piézométrique s'aplanit brusquement sur le plateau de grès, à la limite avec les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, à partir d'où elle diminue doucement, radialement vers la mer, jusqu'à tendre vers 0 m le long des côtes. L'eau souterraine s'écoule donc radialement du centre des îles vers la mer.

En moyenne, dans les unités géologiques formant les buttes centrales (formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons, les dykes et stocks de gabbro, et incluant le Membre de l'Étang-du-Nord), la surface piézométrique se situe à 26 m au-dessus du niveau moyen de la mer. Sur les plateaux de grès, en considérant le Membre de l'Étang-des-Caps et les dépôts meubles chenalisés, elle est en moyenne à 4 m d'élévation. Les modèles hydrogéologiques, qui ne couvrent les dunes de sable qu'en périphérie des îles rocheuses principales, montrent une moyenne piézométrique de 1 m dans cette unité géologique. À l'échelle de l'archipel, la surface libre de la nappe se situe à moins de 5 m d'élévation sur environ 50 % du territoire (Tableau 8.5).

Les élévations culminent à près de 90 m au centre des deux plus grandes îles de l'archipel (îles du Cap aux Meules et du Havre Aubert). Sur les îles du Havre aux Maisons, d'Entrée et la Grosse Île, elles atteignent 40, 30 m et 15 m respectivement, tandis que sur les îles de la Grande Entrée et aux Loups elle ne dépasse pas 2 m.

**Tableau 8.5 : Distribution des élévations de la surface piézométrique**

Quantile (%)	Élévation (m)
0	0
25	1,4
50	4,8
75	17,4
100	86,8

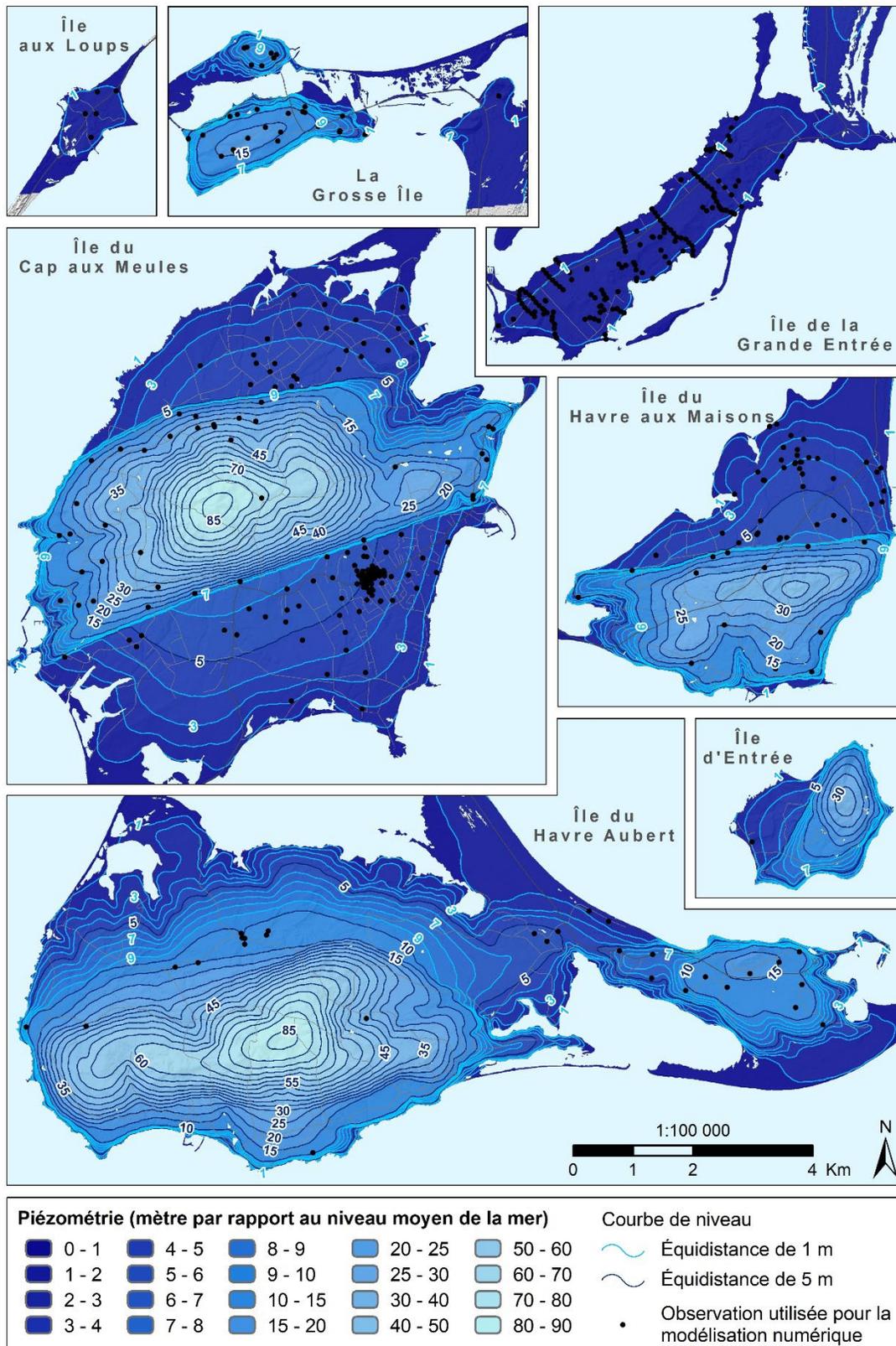


Figure 8.6 : Piézométrie

### **8.3.1.2 Gradients hydrauliques**

La Carte 22 : Gradients hydrauliques horizontaux, en annexe électronique, et la Figure 8.7 illustrent la pente de la surface piézométrique sur une grille de 20 m par 20 m. Les gradients hydrauliques horizontaux varient de 0 à 0,25 m/m. De manière générale, ils sont plus élevés sur les buttes centrales que pour les plateaux de grès, ce qui signifie que l'élévation de la surface libre de la nappe y varie davantage pour une même distance. Les sommets des collines présentent des gradients plus faibles, puisque les pics d'élévation piézométrique sont aplanis, mais cet effet est très localisé. Sur les plateaux de grès, les gradients diminuent abruptement, d'environ un ordre de grandeur, à la limite avec les grès de l'Étang-des-Caps. Les gradients augmentent ensuite doucement vers la mer, pour atteindre autour de 0,01 m/m près des côtes.

Dans les unités géologiques les plus perméables des plateaux de grès, soit le Membre de l'Étang-des-Caps et les dépôts meubles chenalisés, le gradient hydraulique horizontal est en moyenne de 0,004 m/m, c'est-à-dire que l'élévation de la surface libre de la nappe diminue en moyenne de 4 mètres par kilomètre de distance. Le gradient est plus élevé dans les roches moins perméables des buttes centrales combinées à celles du Membre de l'Étang-du-Nord, soit de 0,037 m/m en moyenne (37 m par km). C'est dans les portions modélisées des dunes de sable que le gradient moyen est le plus faible, soit d'à peine 0,001 m/m (1 m par km).

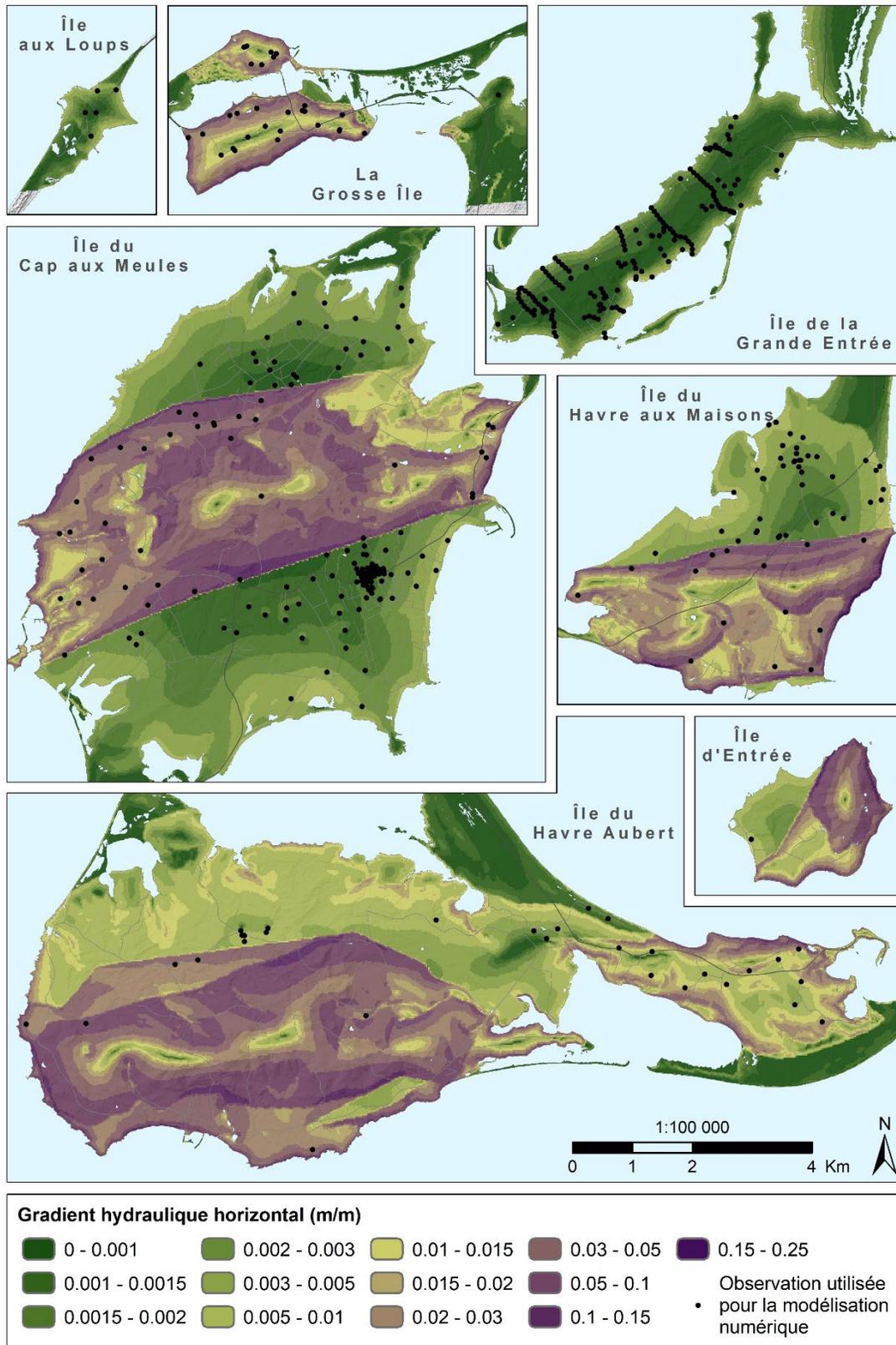


Figure 8.7 : Gradient hydraulique horizontal

### 8.3.1.3 Profondeur à la nappe

La Carte 23 : Profondeur à la nappe, en annexe électronique, et la Figure 8.8 montrent, sur la même grille de 20 m par 20 m que pour la piézométrie, la profondeur de la surface libre de la nappe à partir du sol. Celle-ci a été obtenue en soustrayant les élévations piézométriques (Carte 21) des élévations du sol du MAN (Carte 5).

La profondeur à la nappe, variant de 0 m à 140 m sur l'ensemble du territoire d'étude, présente une surface moins adoucie que la piézométrie. Les profondeurs maximales se situent sur les buttes centrales, et décroissent vers la côte, où la nappe affleure (< 0 m) notamment au niveau des plages. Généralement, les profondeurs varient plus rapidement sous les buttes centrales que sous les plateaux de grès. La profondeur à la nappe décroît aussi, mais plus localement, vers le réseau hydrographique de surface formé par les dépressions topographiques. Des affleurements de la nappe sont souvent observés au droit des cours d'eau permanent et même parfois des ruisseaux intermittents.

En moyenne, la surface libre de la nappe se situe à 13 m sous la surface du sol des buttes centrales et à 9 m sous les plateaux de grès. Sur l'ensemble du territoire modélisé, on observe la même moyenne de 9 m, mais sur la moitié du territoire, la profondeur est de moins de 5 m (Tableau 8.6). La profondeur à la nappe est très faible, en moyenne de moins de 1 m, au droit des dunes de sable.

La profondeur maximale de l'archipel de près de 140 m se situe sous la Big Hill de l'île d'Entrée. Sur les îles du Havre aux Maisons, du Havre Aubert, du Cap aux Meules et de la Grosse Île, les profondeurs à la nappe varient de 0 à autour de 75 à 85 m. Sur l'île de la Grande Entrée, puisque le relief est moins important, la profondeur maximale atteinte est plus faible, soit de 42 m. Elle dépasse à peine 20 m sur l'île aux Loups.

**Tableau 8.6 : Distribution des profondeurs de la surface piézométrique**

Quantile (%)	Profondeur (m)
0	0
25	0,3
50	4,8
75	13,3
100	137,8

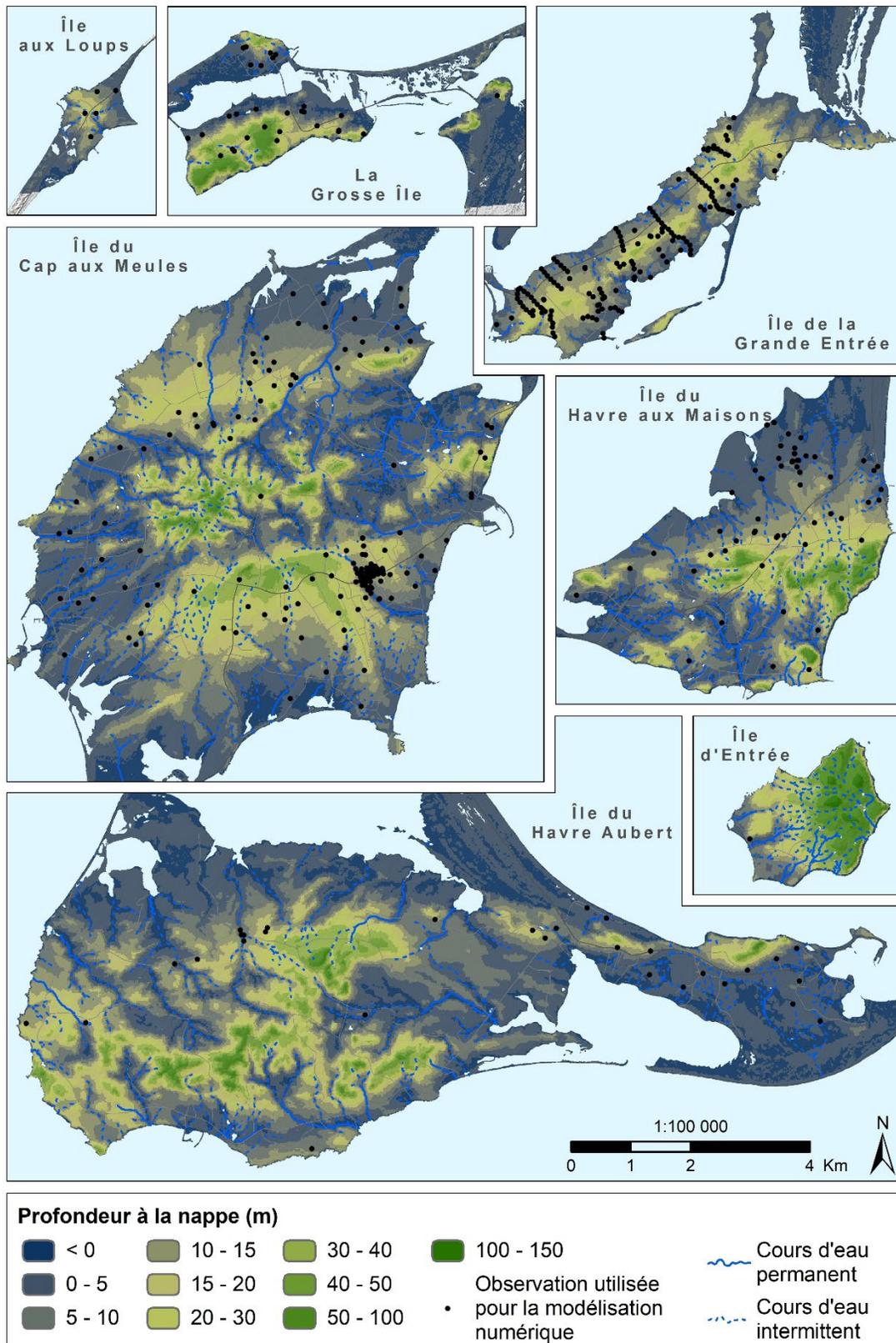


Figure 8.8 : Profondeur à la nappe

### 8.3.1.4 Suivis piézométriques

Tel que mentionné à la Section 4.1.2, de nombreux suivis piézométriques ont été réalisés aux îles de la Madeleine. Ces suivis permettent d'observer les variations saisonnières ainsi que les tendances à long terme.

Les chroniques temporelles de niveau d'eau, montrées à la Figure 8.9 pour six anciens puits d'observation du RSESQ, représentent les données sur la plus longue période de temps disponible. À noter que ces puits ne sont plus suivis à ce jour. On observe des variations saisonnières maximales d'environ 2,5 m pour le puits 13007021. Les variations saisonnières sont semblables pour les autres puits, variant autour de 1,5 et 2 m.

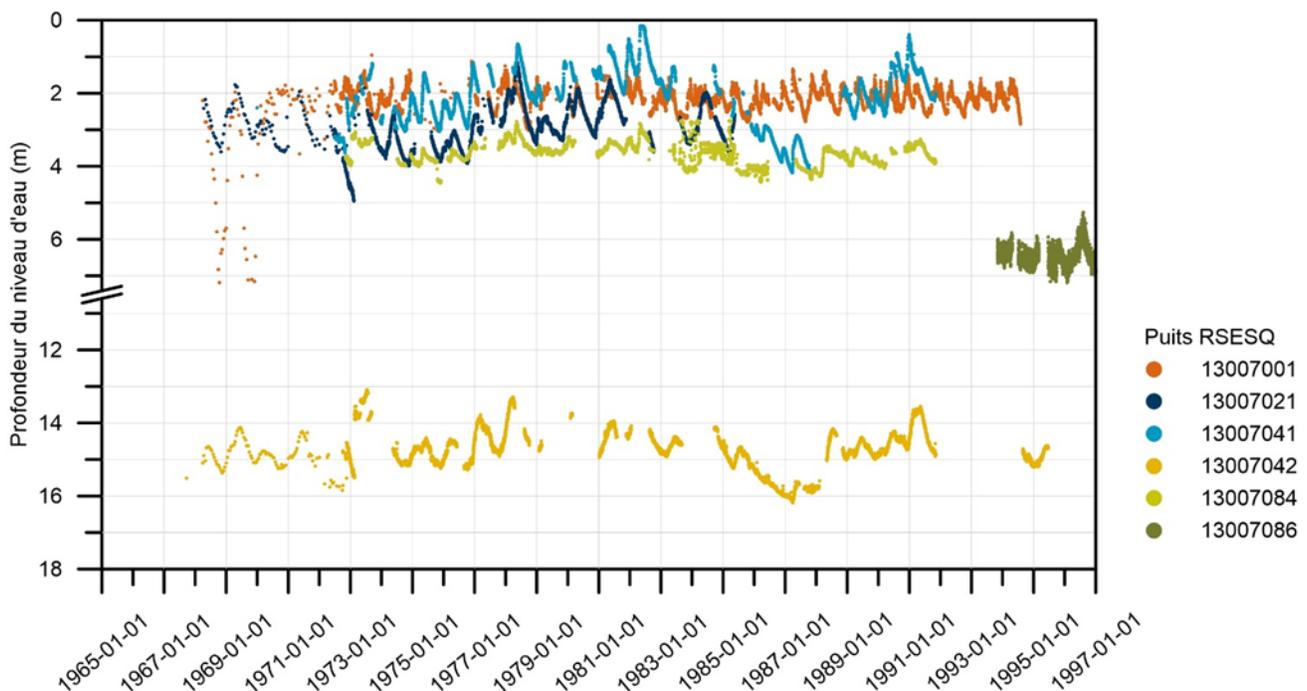


Figure 8.9 : Historique des niveaux d'eau dans six puits d'observation du RSESQ

L'ensemble des données disponibles pour le suivi de la nappe phréatique aux îles de la Madeleine ont été regroupées et mis en page pour la Grosse Île et l'île de la Grande Entrée (Figure 8.10), les îles du Havre aux Maisons et du Havre Aubert (Figure 8.11) ainsi que l'île du Cap aux Meules (Figure 8.12). Les graphiques présentent la charge hydraulique pour la période 1968-2000 ou 2010-2022, selon la disponibilité des données. Les mesures sont issues des puits du RSESQ opérés par le MELCC, de puits d'observation à proximité des puits d'alimentation municipaux, des puits d'observation d'Hydro-Québec près de la centrale thermique de Cap-aux-Meules, ou des puits privés suivis par l'Université Laval dans le cadre du projet. Tous les puits dont le suivi était toujours en cours durant l'été 2020 ont été nivelés pour permettre le calcul précis de la charge hydraulique.

Sur l'île de la Grande Entrée, les variations saisonnières de charges hydrauliques pour les cinq puits de suivi du MELCC sont d'au plus 0,7 m (Figure 8.10). Les deux puits d'observation municipaux, bien qu'influencés par les puits de pompage situés à proximité, montrent des variations de nappe semblable. Les charges hydrauliques pour les puits oscillent toutes entre 0,6 et 2,0 m.

Pour la Grosse Île, un seul puits, ayant une sonde installée par l'Université Laval, permet d'observer les variations de charge hydraulique (Figure 8.10). Les variations naturelles saisonnières sont d'un peu moins de 1 m.

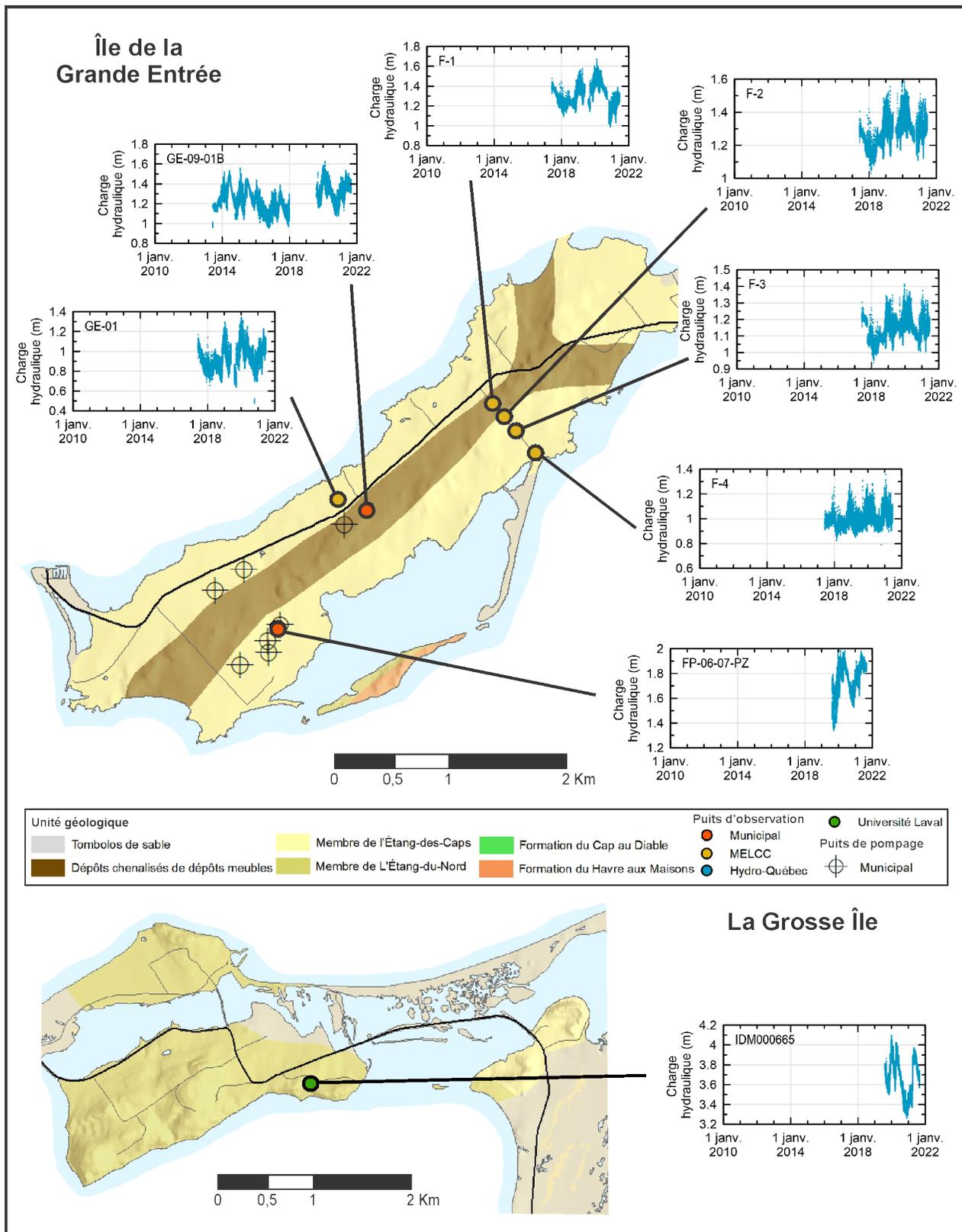


Figure 8.10 : Sommaire des variations temporelles de charge hydraulique pour l'île de la Grande Entrée et la Grosse Île

Pour l'île du Havre aux Maisons, huit puits présentent des données, dont six sont situés dans les grès du Membre de l'Étang-des-Caps (Figure 8.11). Les variations saisonnières de charges hydrauliques sont d'environ de 1 à 2 m. Le puits IDM000103, à la jonction entre le Membre de l'Étang-des-Caps et le Membre de l'Étang-du-Nord, présente des variations saisonnières un peu plus grandes que 2 m. Il en va de même pour le puits 13007041, situé sur un haut topographique, dans les brèches peu perméables de la Formation du Havre aux Maisons. De plus, les charges hydrauliques de ce puits (entre 19 et 24 m) sont plus élevées que pour les autres puits (entre 3 et 10 m).

Pour l'île du Havre Aubert, seulement quatre puits ont fait l'objet d'un suivi piézométrique, deux provenant de l'ancien suivi du RSESQ (MELCC) et deux piézomètres à proximité des puits d'alimentation municipaux (Figure 8.11). Trois des puits sont situés dans le même secteur de l'île, dans les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, et présentent des variations saisonnières de charges hydrauliques d'au plus 4 m entre 2010 et 2022. Les données du puits 13007011 du MELCC, de 1968 à 2000, montrent une diminution de la charge hydraulique dans le temps, passant de 12 à 5 m d'élévation. L'autre puits 13007001 du MELCC, situé près de la côte dans les brèches peu perméables de la Formation du Havre aux Maisons, présente quant à lui des variations de charges hydrauliques plutôt stables, demeurant entre 10 et 12 m d'élévation.

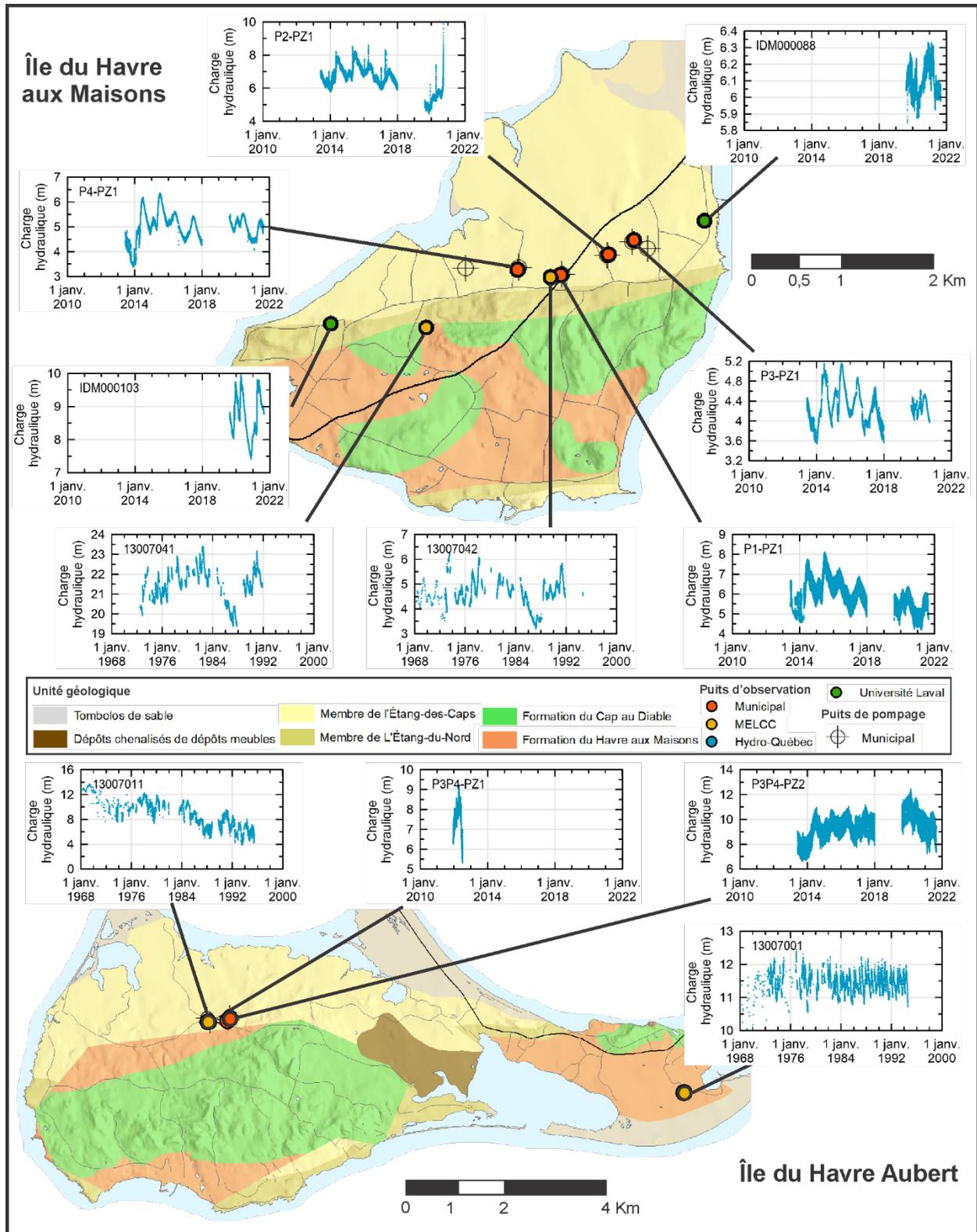


Figure 8.11 : Sommaire des variations temporelles de charge hydraulique pour les îles du Havre aux Maisons et du Havre Aubert

Finalement, pour l'île du Cap aux Meules, les chroniques de charge hydraulique sont présentées pour seulement 12 puits des 24 puits ayant des données de suivi disponibles (Figure 8.12). La sélection a été faite dans le but d'illustrer les puits ayant le plus de données et étant les plus représentatifs d'un secteur, en évitant de surcharger la figure avec l'ensemble des puits. Dû au nombre important de puits d'alimentation municipaux sur l'île du Cap aux Meules, la majorité des mesures présentées sont influencées par ces derniers. Un puits privé instrumenté par l'Université Laval (IDM001260), situé dans les roches volcaniques peu perméables de la Formation du Cap au Diable, au centre de l'île, présente les charges hydrauliques les plus importantes, entre 70 et 77 m, et représente bien les variations saisonnières naturelles d'environ 4 m. Trois puits du MELCC (13007021, 13007031 et 13007084) présentent des données historiques de 1968 à 2000, pour lesquels les variations saisonnières de charges hydrauliques sont d'au plus 2 m.

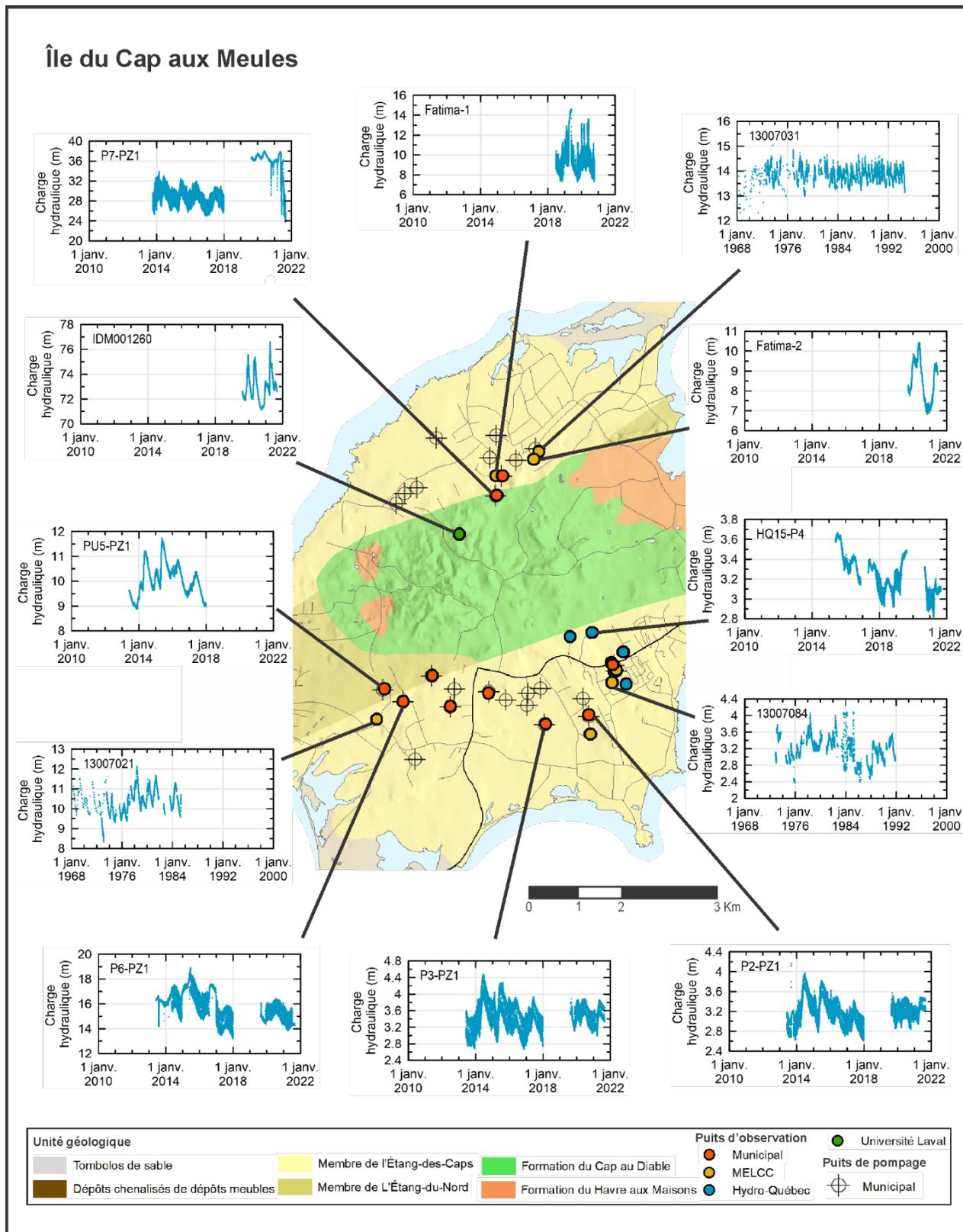


Figure 8.12 : Sommaire des variations temporelles de charge hydraulique pour l'île du Cap aux Meules

### 8.3.1.5 Effet des marées

Les suivis piézométriques réalisés à proximité de la côte sont parfois bruités en raison de l'influence des marées. Pour ces puits, une analyse fréquentielle (transformée de Fourier) a permis d'identifier les fréquences du signal piézométrique associées aux marées. Ces fréquences ont ensuite été retirées du signal piézométrique. La différence entre la courbe originale et corrigée fournit l'amplitude des variations piézométriques associées aux marées. Une moyenne de cette amplitude a été calculée pour chaque puits situé près de la côte pour lesquels un suivi piézométrique était disponible. Ensuite, un graphique de l'amplitude selon la distance de la côte a été préparé (Figure 8.13). Celui-ci inclut l'amplitude moyenne de la marée, soit 35 cm (Section 2.3.8). Sur une échelle semi-logarithmique, une relation linéaire existe entre l'amplitude et la distance de la côte. À partir de cette relation, il peut être observé que des variations piézométriques attribuables aux marées de l'ordre de 1 cm peuvent être mesurées à une distance allant jusqu'à environ 450 m de la côte. Cette relation peut être utilisée afin de quantifier l'incertitude sur les niveaux d'eau associés à la marée, selon la distance du puits à la côte.

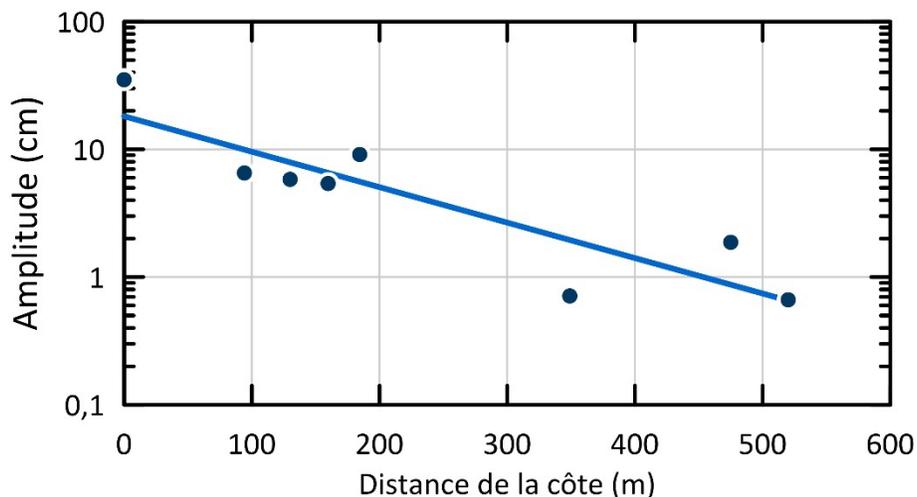


Figure 8.13 : Amplitude des variations piézométriques attribuables à la marée selon la distance à la côte

### 8.3.2 Position de l'interface eau douce – eau salée

Un des objectifs principaux de la modélisation numérique dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* est de déterminer la position de l'interface eau douce – eau salée. L'élévation de l'interface est une sortie des modèles d'écoulement souterrains calibrés (Annexe 11). Les profondeurs sont ensuite calculées en soustrayant les élévations de l'interface des élévations du sol du MAN (Carte 5).

Les élévations de l'interface eau douce – eau salée calculées ne peuvent être inférieures à la base des modèles numériques, fixée à 500 m sous le niveau moyen de la mer pour la plupart des îles (Section 7.5.1). Pour la Grosse Île et l'île de la Grande Entrée, les limites inférieures des modèles ont été établies à 350 et 300 m sous le niveau marin, respectivement. Aux droits où la position de l'interface modélisée atteint la base du modèle, il est fort probable qu'en réalité, l'interface soit plus profonde.

L'élévation par rapport au niveau moyen local de la mer et la profondeur à partir de la surface du sol de l'interface eau douce – eau salée sont présentées, sur des mailles de 20 m par 20 m, à la Carte 24 : Élévation de l'interface eau douce – eau salée, et la Carte 25 : Profondeur de l'interface eau douce – eau salée, en annexes électroniques. Les Figure 8.14 et Figure 8.15 illustrent à leur tour, sur les îles principales, l'élévation et la profondeur, respectivement, de l'interface. Les points d'observation sont également localisés sur les cartes et les figures. Les mêmes constats que pour la piézométrie (Section 8.3.1.1) concernant l'incertitude des résultats s'appliquent.

Les cartographies de l'élévation et de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée sont relativement semblables, avec les valeurs négatives des élévations correspondant aux valeurs positives des profondeurs. À l'échelle de l'ensemble du territoire d'étude, les valeurs varient de 0 à -500 m ou moins pour les élévations et de 0 à 500 m ou plus pour les profondeurs. Les distributions des valeurs présentées au Tableau 8.7 sont aussi relativement semblables, avec des médianes respectives de -168 et 199 m. Les élévations du sol, dont la gamme de valeurs et la médiane sont beaucoup plus faibles, respectivement de 0 à 169 m et de 7,1 m (Tableau 2.1 de la Section 2.3.1), expliquent la similitude entre les élévations et les profondeurs de l'interface.

**Tableau 8.7 : Distribution des élévations et des profondeurs de l'interface eau douce – eau salée**

Quantile (%)	Élévation (m)	Profondeur (m)
0	0	0
25	-51	61
50	-168	199
75	n.d.*	n.d.*
100	n.d.*	n.d.*

*\* Ces valeurs ne sont pas présentées, car elles sont biaisées par le fait que la position de l'interface atteint les limites inférieures des modèles*

L'interface eau douce – eau salée est la plus profonde sous les buttes du centre des îles, atteignant généralement la limite inférieure des modèles hydrogéologiques. Sous les plateaux de grès, la profondeur diminue abruptement à la frontière avec les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, parfois de quelques centaines de mètres. L'interface remonte ensuite relativement doucement vers les côtes, selon un gradient moyen de 16 %, équivalent à 160 mètres par kilomètre de distance. Elle atteint des valeurs autour de 0 m de profondeur en bordure de mer.

L'interface est positionnée à moins de 200 m sous la surface du sol sur la moitié de l'archipel (Tableau 8.7). Sous les plateaux gréseux, dans les grès du Membre de l'Étang-des-Caps et les dépôts meubles chenalisés, la moyenne de la profondeur de l'interface est de 152 m. Pour les buttes centrales, en incluant les roches du Membre de l'Étang-du-Nord, la moyenne est certainement plus élevée que pour les plateaux de grès, mais elle ne peut pas être calculée, car elle serait biaisée par le fait que la limite inférieure des modèles est atteinte. Elle est la plus faible sous les portions des dunes de sable incluses dans les modèles, avec une moyenne de 33 m.

Sur toutes les îles, sauf les îles de la Grande Entrée et aux Loups, la position de l'interface atteint la limite inférieure du modèle sous les buttes centrales. Elle se situe donc à 500 m ou plus de profondeur à ces endroits pour les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons et d'Entrée, et à plus de 350 m de profondeur pour la Grosse Île. Sur l'île aux Loups, le maximum atteint est de 85 m de profondeur, soit largement au-dessus de la base du modèle à 500 m sous le niveau moyen de la mer. Le constat est similaire pour l'île de la Grande Entrée, car l'interface se situe partout à moins de 95 m de profondeur, tandis que la base du modèle est plus profonde, soit à 300 m sous le niveau marin.

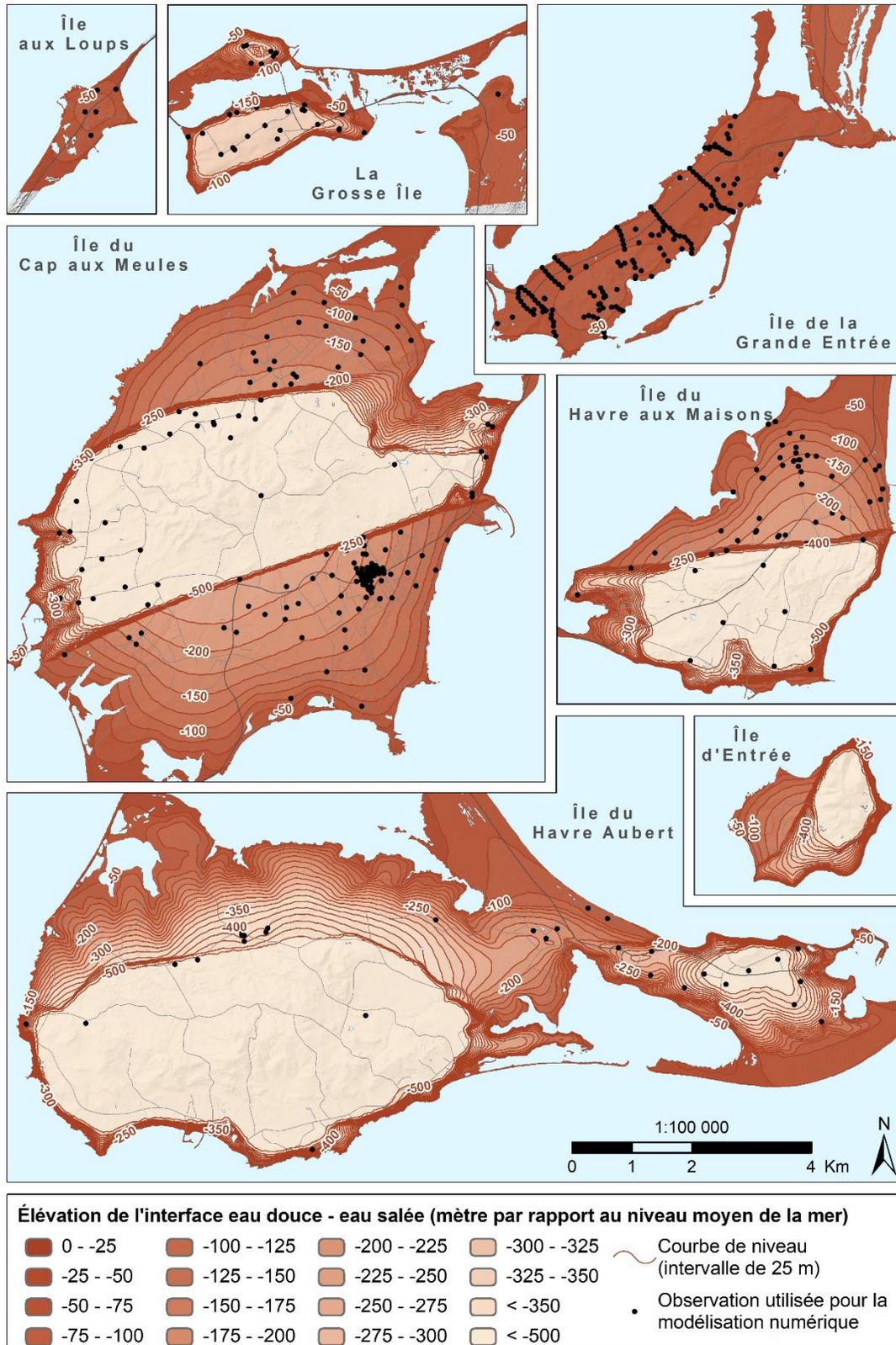


Figure 8.14 : Élévation de l'interface eau douce – eau salée

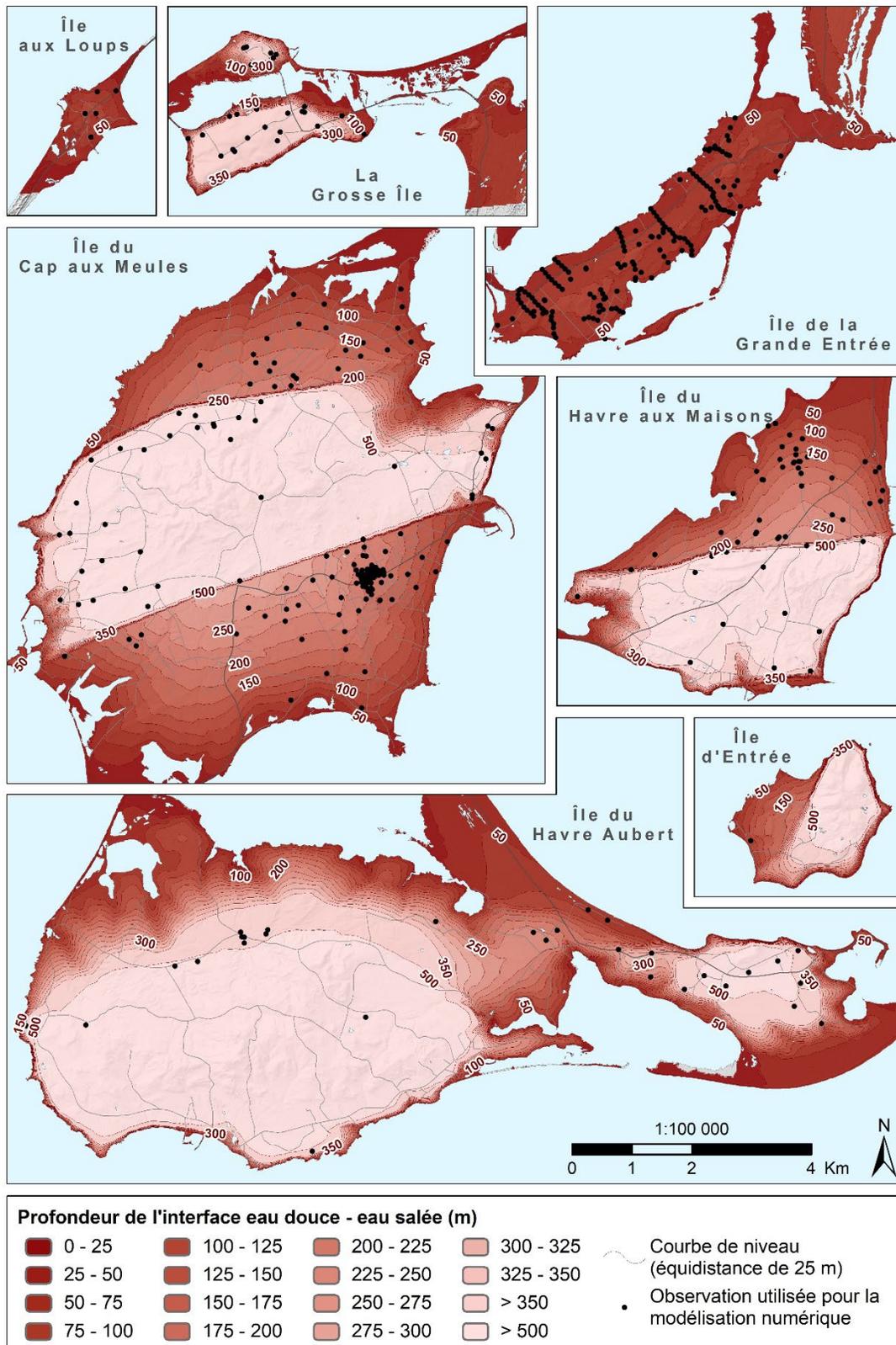


Figure 8.15 : Profondeur de l'interface eau douce – eau salée

### 8.3.3 Épaisseur de la lentille d'eau douce

L'épaisseur de la lentille d'eau douce se calcule en soustrayant la profondeur à la nappe (Carte 23) à la profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Carte 25). La Carte 26 : Épaisseur de la lentille d'eau douce, en annexe électronique, ainsi que la Figure 8.16 montrent l'épaisseur de la zone contenant de l'eau souterraine douce. Cette cartographie, ainsi que la distribution des résultats (Tableau 8.8), ressemblent énormément à celles de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Tableau 8.7 de la Section 8.3.2). Les épaisseurs varient de 0 à 500 m ou plus et la médiane est de près de 200 m. La gamme de valeurs de la profondeur à la nappe, de 0 à 138 m, et la médiane, de 4,8 m, sont beaucoup plus faibles (Tableau 8.6 de la Section 8.3.1.3), expliquant ainsi la faible différence entre l'épaisseur de la lentille et la profondeur de l'interface.

Les épaisseurs les plus importantes s'observent sous les buttes centrales. Comme pour la modélisation de l'interface, la lentille d'eau douce est probablement plus épaisse aux endroits où la position de l'interface atteint la base des modèles. Elle diminue de façon très abrupte à la limite avec les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, pour ensuite décroître doucement le long du plateau gréseux en direction de la mer, où elle devient nulle.

La moyenne de l'épaisseur de la lentille d'eau douce est de 143 m sous les plateaux de grès et de 32 m sous les portions des dunes de sable. Puisque la position de l'interface eau douce – eau salée atteint la base des modèles sous les buttes centrales, la moyenne de l'épaisseur de la lentille ne peut y être calculée. Environ la moitié du territoire modélisé présente une lentille d'eau douce de 189 m ou plus (Tableau 8.8).

Les constats similaires à la profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Section 8.3.2) sont observables pour l'épaisseur de la lentille d'eau douce de chaque île. À l'exception des îles de la Grande Entrée et aux Loups, les épaisseurs de la lentille calculées sont limitées par la base des modèles numériques. L'épaisseur atteint 500 m ou plus sous les buttes centrales des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons et d'Entrée, et 350 m ou plus pour la Grosse Île. La lentille ne dépasse pas 65 m d'épaisseur sur les îles aux Loups et de la Grande Entrée.

**Tableau 8.8 : Distribution des épaisseurs de la lentille d'eau douce**

Quantile (%)	Épaisseur de la lentille (m)
0	0
25	55
50	189
75	n.d.*
100	n.d.*

*\* Ces valeurs ne sont pas présentées, car elles sont biaisées par le fait que la position de l'interface atteint les limites inférieures des modèles*

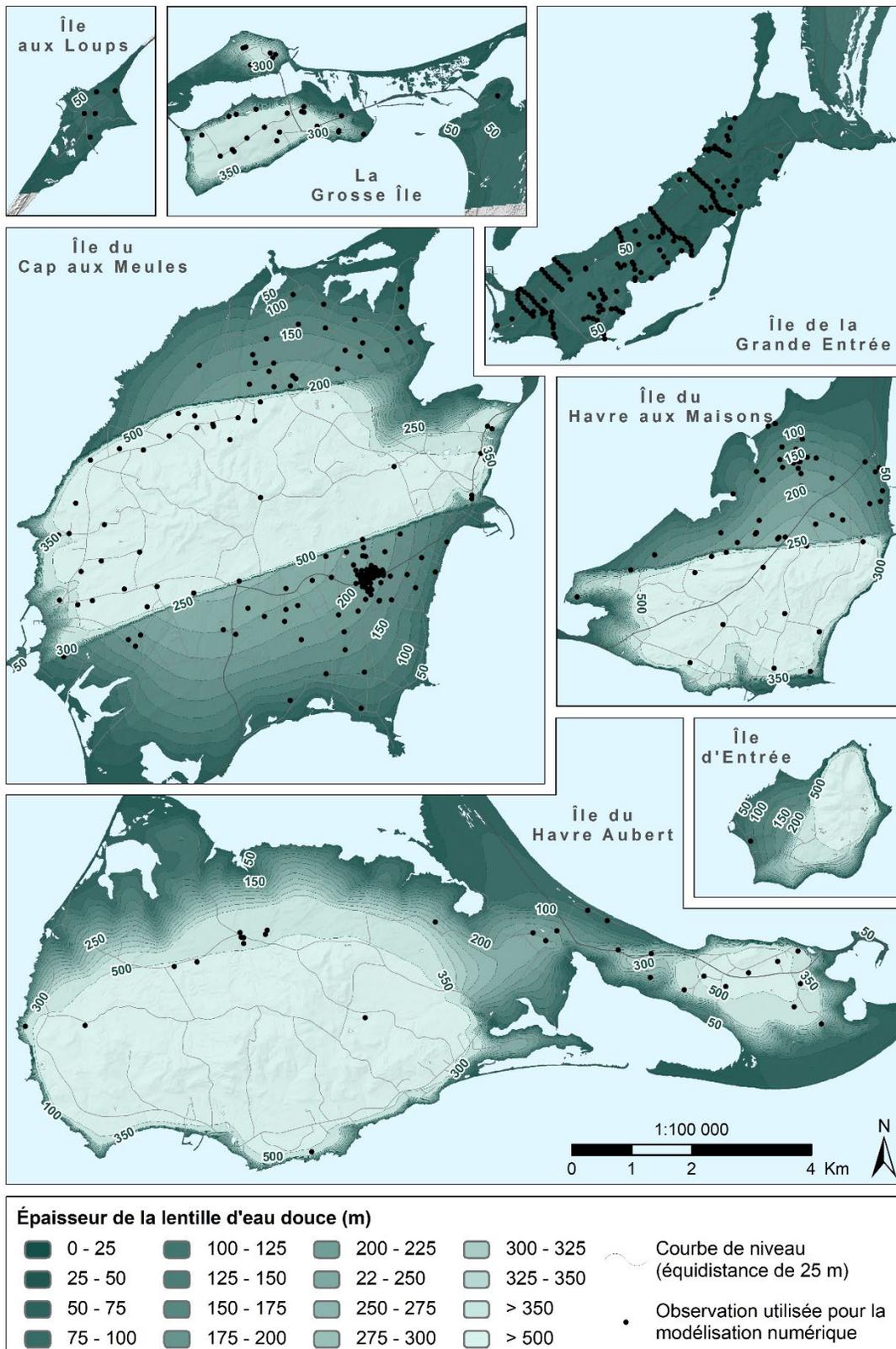


Figure 8.16 : Épaisseur de la lentille d'eau douce

### 8.3.4 Volume d'eau disponible

En multipliant l'épaisseur de la lentille d'eau douce par la porosité totale de l'aquifère, on obtient le volume total d'eau douce contenu dans le sous-sol. L'épaisseur de la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée est de l'ordre de quelques mètres (Figure 5.23) celle-ci est négligée pour ces calculs. Pour connaître la portion de cette eau qui est disponible, il suffit de multiplier l'épaisseur de la lentille d'eau douce par la porosité de drainage de l'aquifère. Ce volume d'eau constitue la réserve en eau souterraine disponible des îles de la Madeleine. Toutefois, seule une fraction de cette réserve pourrait être exploitée durablement par des puits.

Les plateaux de grès sont constitués des aquifères les plus importants, composés des matériaux les plus perméables des îles rocheuses (excluant les dunes de sable). Il s'agit des unités géologiques des membres de l'Étang-des-Caps, de l'Étang-du-Nord et des dépôts meubles chenalisés, aux potentiels d'exploitation respectifs de très élevé, élevé et moyen, tel que défini à la Section 8.2.5, à la Carte 20 et à la Figure 8.5. Au total pour l'archipel, le volume de ces aquifères, pour les portions contenant la lentille d'eau douce seulement, est d'environ 14 000 Mm<sup>3</sup> (Tableau 8.9). En considérant les porosités totales retenues pour chaque unité géologique (Tableau 8.3 de la Section 8.1.2), l'eau souterraine occuperait entre 20 à 30 % du volume total de ces aquifères, ce qui donne un volume total d'environ 3 500 Mm<sup>3</sup> d'eau. Enfin, en considérant les porosités de drainage retenues pour ces mêmes unités géologiques, qui sont de 75 % de celles des porosités totales respectives (Tableau 8.3 de la Section 8.1.2), environ 2 700 Mm<sup>3</sup> d'eau souterraine serait disponible aux îles de la Madeleine.

**Tableau 8.9 : Volumes d'eau totale et d'eau disponible de la lentille d'eau douce contenus dans les unités géologiques les plus perméables**

Unité géologique	Volume de l'aquifère (Mm <sup>3</sup> )	Porosité totale	Volume d'eau totale (Mm <sup>3</sup> )	Porosité de drainage	Volume d'eau disponible (Mm <sup>3</sup> )
Dépôts meubles chenalisés	602	0,30	180	0,22	132
Membre de l'Étang-des-Caps	8 001	0,30	2 400	0,22	1 760
Membre de l'Étang-du-Nord	5 477	0,20	1 095	0,15	822
<b>Total</b>	<b>14 080</b>		<b>3 676</b>		<b>2 714</b>

Les volumes des aquifères, d'eau souterraine totale et d'eau disponible, en considérant les mêmes portions d'aquifères des plateaux de grès qui contiennent la lentille d'eau douce, sont présentés pour chacune des îles principales au Tableau 8.10. Les deux plus grandes îles, soit celles du Cap aux Meules et du Havre Aubert, possèdent les volumes les plus élevés, soit autour de 1 Mm<sup>3</sup> chacune pour l'eau disponible. À elles deux, elles comptent pour 78 % de toute l'eau disponible de l'archipel. L'île du Havre aux Maisons suit, avec des valeurs environ 3 fois plus faibles, représentant 11 % du total de l'eau disponible. Puis, par ordre décroissant, viennent la Grosse Île, l'île de la Grande Entrée, l'île d'Entrée et l'île aux Loups, avec des volumes respectifs environ 6, 12, 20 et 100 fois plus faibles que pour les deux plus grandes îles, correspondant à des proportions de 6, 3, 2 et moins de 1 %, respectivement, de l'eau disponible des îles de la Madeleine. En général, plus la superficie d'une île est grande (Figure 2.2 de la

Section 2.1), plus les volumes sont élevés. Seule l'île de la Grande Entrée fait exception, avec des volumes 2 à 3 fois plus faibles que pour la Grosse Île, malgré qu'elle soit 2 fois plus vaste. Ceci s'explique par le fait que l'élévation de la nappe phréatique soit moins élevée, engendrant en une lentille d'eau douce plus mince.

**Tableau 8.10 : Volumes d'eau totale et d'eau disponible de la lentille d'eau douce contenus dans les aquifères de chacune des îles principales**

Île	Volume de l'aquifère	Volume d'eau totale	Volume d'eau disponible	
	(Mm <sup>3</sup> )	(Mm <sup>3</sup> )	(Mm <sup>3</sup> )	(%)
Du Cap aux Meules	6 211	1 567	1 159	42,7
Du Havre Aubert	4 614	1 298	955	35,2
Du Havre aux Maisons	1 621	420	311	11,4
Grosse Île	996	201	151	5,6
De la Grande Entrée	347	104	76	2,8
D'Entrée	249	74	54	2,0
Aux Loups	41	12	9	0,3
<b>Total</b>	<b>14 080</b>	<b>3 676</b>	<b>2 715</b>	<b>100,0</b>

## 8.4 Recharge, résurgences et bilan hydrologique

### 8.4.1 Analyse d'hydrogrammes de puits

Comme ailleurs au Québec, la recharge des nappes phréatiques aux îles de la Madeleine s'effectue principalement à l'automne et au printemps. Toutefois, en raison des hivers doux dus au climat maritime de l'archipel, des épisodes de recharge hivernale peuvent également survenir.

La recharge de la nappe phréatique peut être observée par un suivi piézométrique et correspond habituellement à une hausse de la charge hydraulique, qui se traduit par une remontée de la nappe en condition de nappe libre. Il est à noter que les épisodes de recharge ne donnent pas toujours lieu à une remontée de nappe et ils se manifestent parfois par un bris de pente dans la courbe de récession. Aussi, pour un même événement de précipitation, les variations de nappe peuvent être très différentes selon la pente du sol, le couvert végétal, la nature du sol, de la zone vadose et de l'aquifère, et même la profondeur à la nappe.

Afin d'illustrer de manière générale le processus de recharge aux îles de la Madeleine et son influence sur le niveau de la nappe phréatique, trois hydrogrammes de puits sont présentés à la Figure 8.17. Deux puits sont situés dans les grès du Membre de l'Étang-du-Nord (IDM000103 et IDM000665) et l'autre dans les roches volcaniques de la Formation du Cap au Diable (IDM001260). Ces puits sont localisés respectivement sur les îles du Havre aux Maisons (Figure 8.11), la Grosse Île (Figure 8.10) et du Cap aux Meules (Figure 8.12). Les données de profondeur à la nappe sont présentées pour deux années hydrologiques, pour apprécier l'effet de cette variable sur les variations saisonnières. Une année hydrologique débute le 1er octobre et se termine le 30 septembre suivant.

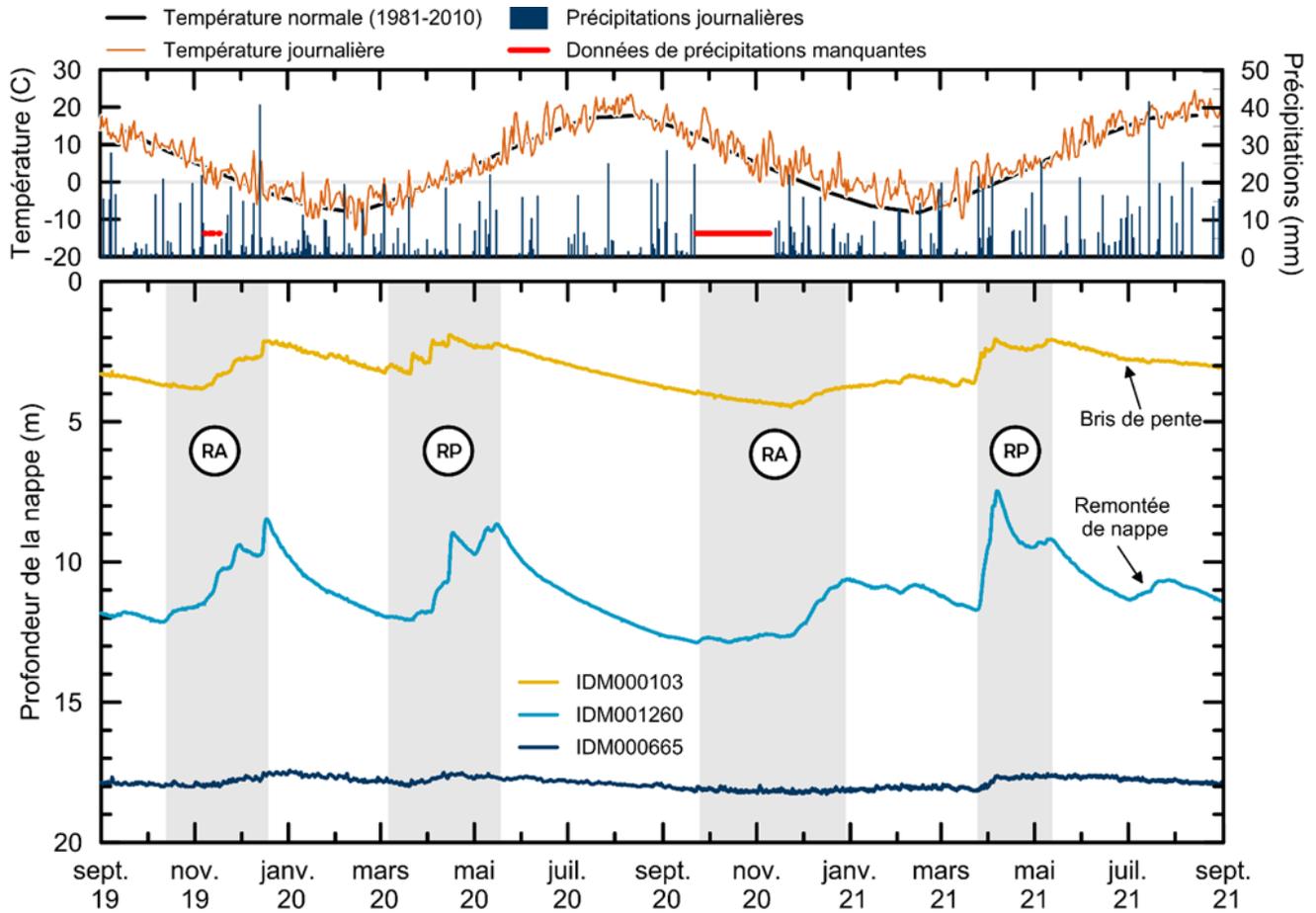


Figure 8.17 : Haut : Températures journalière et normale (1981-2010), et précipitations journalières mesurées à la station météorologique Île de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) de septembre 2019 à août 2021. Bas : Profondeur à la nappe observée dans trois puits (RA : Recharge automnale, RP : recharge printanière)

En automne, la baisse des températures et le ralentissement de la consommation en eau par les végétaux font en sorte que l'évapotranspiration est faible. Les précipitations deviennent plus importantes, avec des valeurs maximales habituellement mesurées en novembre, ce qui donne lieu au premier épisode de recharge saisonnière de l'année hydrologique. En 2019, la recharge s'étale depuis le début octobre jusqu'à la mi-décembre pour les puits IDM000103 et IDM001260. Toutefois, en 2020, la remontée de nappe est plus faible et elle est notable à partir de fin septembre, uniquement pour le puits IDM001260, puis une augmentation significative se produit dans les deux puits de la mi-novembre à la fin-décembre.

En hiver, en raison du gel au sol et étant donné qu'il y a des précipitations sous forme neigeuse, la recharge des nappes est généralement faible à nulle. Par exemple pour l'hiver 2020, les niveaux d'eau diminuent progressivement de la mi-décembre jusqu'au début mars, ce qui signifie qu'il n'y a pratiquement pas de recharge durant cette période. Toutefois, en 2021, de nombreuses petites remontées de nappe sont visibles de janvier à mars pour les puits IDM000103 et IDM001260, ce qui indique qu'une faible recharge des nappes se produit. Cela peut être dû au fait que pour l'hiver 2021, la température journalière est plus élevée que pour l'hiver 2020, et même plus élevée que la normale climatique. De plus, en raison du climat maritime des îles de la Madeleine, il existe des épisodes de précipitations liquides fréquents en hiver. Selon les archives climatiques d'environnement Canada, la normale de précipitations de pluie hivernale pour la période 1981-2010 est de 38,6 mm/mois (Tableau 2.9 de la section 2.3.7.1). La tendance historique montre que les hivers sont de plus en plus pluvieux et de moins en moins neigeux (Section 2.3.7.2), favorisant ainsi la recharge hivernale. Les scénarios de changements climatiques aux îles de la Madeleine prévoient une augmentation de température moyenne à l'horizon 2050 (Section 2.3.7.3), qui devrait accélérer cette tendance.

Au printemps, la fonte des neiges produit une certaine quantité d'eau liquide qui, avec les précipitations, s'infiltré dans le sol pour recharger la nappe phréatique. Cet épisode s'étend de début mars à la mi-mai pour 2019 et de fin mars à début mai pour 2021. L'étude de la Figure 8.17 permet de constater que la durée des épisodes de recharge et leur effet sur la remontée de nappe varient beaucoup d'une année hydrologique à l'autre. Par exemple, en 2019-2020, la recharge automnale et printanière ont une durée assez semblable et mènent à des remontées de nappe semblables. Or, pour l'année 2020-2021, la recharge automnale est plus longue et la remontée de nappe plus faible, tandis qu'elle est plus courte au printemps, mais plus importante.

En été, les températures plus élevées et les vents importants font en sorte que les précipitations, même si elles sont à peu près équivalentes à celles du printemps, vont s'évaporer ou être consommées par les plantes. Tel qu'il peut être observé dans les hydrogrammes des puits IDM000103 et IDM001260, la nappe phréatique est alors en période de récession, c'est-à-dire que son niveau diminue constamment. Pour l'été 2020, aucun épisode de recharge ponctuel ne peut être observé durant cette période. Toutefois, il est possible que les précipitations excèdent le potentiel d'évapotranspiration et entraînant un épisode de recharge estival. C'est le cas au mois de juillet 2021, où des précipitations importantes ont donné lieu à une remontée de nappe au puits IDM001260, et un bris dans la pente de récession au puits IDM000103.

Tel que mentionné plus haut, la recharge des nappes aura un effet différent sur la remontée de la nappe phréatique selon la nature du milieu géologique et la profondeur de la nappe. En effet pour une même

quantité de recharge, la remontée de la nappe sera plus importante pour des roches peu poreuses que pour des roches très poreuses qui peuvent emmagasiner une quantité plus grande d'eau pour un même volume de roche. Par exemple, les puits IDM000103 et IDM001260 de la Figure 8.17 sont situés dans deux types de roches différentes, soit des grès poreux et des roches volcaniques fracturées, mais peu poreuses, respectivement. Pour le puits IDM001260, la remontée du niveau d'eau lors des épisodes de recharge peut atteindre presque 4 m, tandis qu'elle est de moins de 2 m pour le puits IDM000103, situé dans les grès. De plus, la remontée de nappe dépend également de sa profondeur. Plus la nappe est profonde, moins l'amplitude de la remontée est grande, car plus elle est diffuse dans le temps. Ainsi, les événements de recharge épisodique sont moins marqués. Cela peut être observé sur la Figure 8.17 en comparant les puits IDM000103 et IDM000665, qui sont situés dans un même type de roche (grès), mais à des profondeurs différentes. Pour le puits IDM000103, les événements de recharge ponctuelle sont bien visibles et la montée de nappe saisonnière atteint presque 2 m, tandis que pour le puits IDM000665, la remontée de nappe est faible et se présente sous la forme de deux cycles de grande amplitude.

## **8.4.2 Modélisation du bilan hydrologique**

### **8.4.2.1 Description du programme SWB2**

Le bilan hydrologique décrit le devenir des précipitations sur un territoire. Il s'agit de la résultante de processus complexes du cycle de l'eau interagissant les uns avec les autres, notamment l'interception, la fonte de la neige, le ruissellement de surface, l'infiltration, l'évapotranspiration et l'écoulement en zone non saturée. Le bilan hydrologique est classiquement composé de trois variables principales : le ruissellement de surface, l'évapotranspiration et la recharge des eaux souterraines. La recharge, en plus des besoins liés à la modélisation numérique des écoulements, est également une connaissance très utile pour la compréhension des processus en jeu sur le territoire et la gestion de la ressource.

Dans la plupart des études hydrogéologiques récentes portant sur le territoire des îles de la Madeleine (ex. : Groupe Madelin'eau, 2003, 2004, 2009), une valeur de recharge unique de 230 mm/an, estimée par Leblanc (1994), a été utilisée. Cette valeur provient de l'analyse d'une chronique de mesure de la piézométrie d'un puits de l'île du Cap aux Meules et sur une seule année. Le résultat, en plus de porter une incertitude dépendante de l'analyse en elle-même, n'est représentatif que d'une zone très locale, et une seule année. Pour toutes ces raisons, il est nécessaire de calculer une recharge spatialisée sur l'ensemble du territoire d'étude.

Plusieurs programmes, fréquemment employés, permettent de modéliser un bilan hydrologique complet (incluant la recharge), dont HELP (Schroeder et coll., 1994), Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) (Leavesley et coll., 1983) ou HydroBudget (Dubois et coll., 2021). La représentation des processus au sein de chaque programme peut varier en complexité : par exemple la représentation de la zone non saturée, la prise en compte de la neige hivernale ou le choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration. Les programmes permettant d'estimer les composantes du bilan hydrologique sont normalement calibrés sur des données de débit total et débit de base en rivière. Un enjeu sur le calcul du bilan hydrologique dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* est l'absence de données de débit sur les rares cours d'eau des îles. Pourtant, une calibration des résultats du bilan est essentielle pour s'assurer de le représenter correctement, mais elle peut s'appuyer sur d'autres données observées que le débit, par exemple la piézométrie, pour lesquels il existe de nombreuses mesures sur le territoire (Section 4.2.6).

Les étapes de modélisation sont décrites à la Section 7. La méthodologie de calcul du bilan hydrologique choisie s'appuie sur deux étapes : 1) un calcul préliminaire du bilan hydrologique spatialisé sans calibration avec le programme SWB2 (Westenbroek et coll., 2018), puis 2) la calibration de la recharge sur les données de piézométrie à l'aide des modèles d'écoulement souterrain basés sur MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017). SWB2 propose un bon compromis entre une simulation réaliste du bilan hydrologique (processus représentés, spatialisation du territoire, pas de temps journaliers) et une construction simple du modèle. Étant donnée l'étape nécessaire de calibration des résultats de recharge via les modèles d'écoulements, le choix de SWB2 a été préféré au programme HELP, ce dernier étant certes plus varié dans les options qu'il propose pour représenter les processus (notamment l'évapotranspiration potentielle), mais est plus complexe à mettre en place. Une description détaillée de la méthode de calcul du bilan hydrologique est disponible en Annexe 10.

SWB2 est un modèle basé sur un bilan d'eau. Le territoire est discrétisé en mailles régulières sur lesquelles un bilan d'eau journalier est effectué. Les entrées d'eau et les sorties d'eau sur chaque maille sont fonction de la météo et des caractéristiques de la zone (ex. : coefficient de ruissellement, profondeur racinaire, groupe hydrologique du sol). La somme des entrées (précipitation, fonte de la neige) et des sorties (interception, ruissellement de surface, évapotranspiration) est réalisée quotidiennement et permet de calculer l'humidité du sol. Si celle-ci est supérieure à la capacité au champs, l'excédent est considéré comme de la recharge. SWB2 intègre également des modules d'irrigation de culture, d'interception de brouillard par la végétation et de flux d'eau sortant d'installations septiques, mais ceux-ci n'ont pas été exploités dans le cadre de cette étude.

Les apports verticaux composés de pluie et de neige fondue sont calculés à partir des températures et du contenu de stockage de neige. L'évapotranspiration potentielle est issue de la formule de Hargreaves et Samani (1985) et intègre les données de températures minimales, maximales et le rayonnement solaire. L'évapotranspiration réelle calculée par SWB2 est fonction de l'évapotranspiration potentielle, de l'humidité du sol et de la capacité d'eau disponible du sol. Le ruissellement est généré si la totalité de l'eau arrivant sur une cellule ne peut s'y infiltrer.

#### **8.4.2.2 Acquisition et traitement des données**

L'origine des données utilisées dans le programme SWB2 est listée dans le Tableau 8.11. Les données météorologiques proviennent de la station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) située à l'aéroport sur l'Île du Havre aux Maisons (voir la Section 2.3.7). Sur la période de 30 ans considérée (de juillet 1989 à juin 2019), la moyenne des précipitations totales est de 1 036,0 mm/an, ce qui est quasi identique à la normale climatique de 1 037,3 mm de la période 1981-2010. La température moyenne journalière est la plus faible en février avec -7,0 °C contre -8,2 °C pour les normales climatiques et la température minimale journalière est la plus faible en février également, avec -10,3 °C contre -12,0 °C pour les normales climatiques. En été, la température moyenne quotidienne est la plus élevée en août avec 18,3 °C contre 17,8 °C pour les normales climatiques et la température maximale quotidienne est la plus élevée en août également, avec 21,2 °C contre 21,0 °C pour les normales climatiques.

Les élévations du sol proviennent du MAN dérivé du LiDAR de 2018 du MERN. L'occupation du sol est basée sur les données d'utilisation du territoire du MELCC de 2018 (Section 2.4.2). Les zones urbaines ont été découpées à partir du périmètre urbain du Portrait provincial en aménagement du territoire du MAMH (Section 2.4.3). Pour chaque type d'occupation, une profondeur racinaire et une hauteur

maximale d'interception des précipitations ont été définies selon le type de végétation décrit dans les données d'utilisation du territoire. La période de croissance des végétaux du 10 mai au 30 octobre est celle considérée selon l'Atlas agro-climatique du Québec (Agrométéo Québec, 2021).

Basé sur les données pédologiques (Section 2.3.6), un groupe hydrologique de A à D a été attribué à chaque type de sol selon sa capacité de drainage. Les sols de type A sont très favorables à l'infiltration, tandis que les sols de types D sont les plus favorables au ruissellement. Le coefficient de ruissellement est issu de la combinaison de l'occupation du sol et du groupe hydrologique. La capacité d'eau disponible, elle, réfère à la quantité d'eau d'un sol qui peut être captée par les racines des plantes après drainage par gravité. Il s'agit de la quantité d'eau disponible dans un sol dont l'humidité se situe entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

**Tableau 8.11 : Source des données utilisées dans le modèle bilan hydrologique basé sur le programme SWB2**

Paramètre	Source	Section de référence
Précipitations journalières	Station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) d'Environnement Canada	Section 2.3.7.1
Températures minimales et maximales journalières	Station météorologique Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) d'Environnement Canada	Section 2.3.7.1
Topographie	MAN dérivé du relevé LIDAR de 2018 du MERN	Section 2.3.1
Occupation du sol	Utilisation du territoire du MELCC de 2018 Périmètre urbain du Portrait provincial en aménagement du territoire du MAMH	Section 2.4.2 Section 2.4.3
Profondeur racinaire	Utilisation du territoire du MELCC de 2018 Finch (1998), Canadell et coll. (1996), Croteau (2006), Arnold et coll. (2011), Talbot Poulin et coll. (2013)	Section 2.4.2 Annexe 10
Hauteur maximale d'interception végétale	Utilisation du territoire du MELCC de 2018 Documentation SWB2 (Westenbroek et coll., 2010 et 2018)	Section 2.4.2 Annexe 10
Période de croissance	Atlas agro-climatique du Québec d'Agrométéo Québec (2021)	Annexe 10
Groupes hydrologiques	Pédologie de Tardif (1967) et classification des sols de l'IRDA	Section 2.3.6
Coefficient de ruissellement	Utilisation du territoire du MELCC de 2018 Pédologie de Tardif (1967) et classification des sols de l'IRDA ASCE/WET (1992), Manuel de conception des ponceaux (MTQ, 1995), Guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP, 2012)	Section 2.4.2 Section 2.3.6 Annexe 10
Capacité d'eau disponible pour les plantes	Utilisation du territoire du MELCC de 2018 Documentation SWB2 (Westenbroek et coll., 2010 et 2018)	Sections 2.4.2 Annexe 10

#### **8.4.2.3 Calibration de la recharge par le modèle d'écoulement MODFLOW**

La recharge spatialisée issue du modèle basé sur le programme SWB2 a servi d'intrant aux modèles d'écoulements souterrains (Section 7.5). Elle a été calibrée en même temps que les conductivités hydrauliques des unités géologiques pour s'assurer que les modèles représentent de façon cohérente la piézométrie mesurée sur le terrain (Annexe 11). Lors de la calibration, l'ensemble des valeurs de recharge issu de la simulation avec SWB2 est multiplié par un coefficient libre de varier sur un intervalle allant de 80 % à 120 % (c'est-à-dire  $\pm 100$  mm/an environ). La recharge calibrée sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et du Havre Aubert est respectivement 1,02, 1,11 et 1,12 fois plus élevée que la recharge issue du modèle SWB2. Le modèle d'écoulement sur l'île de Grande-Entrée, réalisé en premier, n'intègre pas la recharge spatialisée, mais seulement une valeur de recharge uniforme (Section 7.5). Sur le reste du territoire, un coefficient multiplicateur de 1,08, correspondant à la moyenne pondérée pour les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et du Havre Aubert, a été utilisé.

#### **8.4.2.4 Bilan hydrologique de surface et bilan hydrologique détaillé**

Les résultats issus du modèle SWB2 permettent de quantifier les composantes de surface du bilan hydrologique (ruissellement et évapotranspiration), ainsi que la recharge. Les modèles d'écoulement souterrains basés sur le programme MODFLOW-2005 aboutissent à un bilan souterrain en quantifiant les différents flux sortant du système (résurgences sur terres, résurgences en mer et pompages municipaux) à partir du flux entrant (recharge). La combinaison du bilan hydrologique de surface et du

bilan hydrologique souterrain permet d'obtenir un bilan hydrologique détaillé, impliquant les composantes de surface et les composantes souterraines.

### **8.4.3 Bilan hydrologique de surface**

#### **8.4.3.1 Bilan hydrologique de surface actuel**

Un bilan hydrologique de surface moyen annuel, incluant le ruissellement de surface, l'évapotranspiration et la recharge, a été obtenu pour la période de 30 ans (de juillet 1989 à juin 2019). Il est présenté au Tableau 8.12. À noter que contrairement à la recharge, le ruissellement de surface et l'évapotranspiration n'ont pas été calibrés à l'aide du programme MODFLOW-2005. Comme la calibration a légèrement augmenté le taux de recharge, le ruissellement et l'évapotranspiration ont été diminués proportionnellement pour équilibrer le bilan avec les précipitations.

Les bilans des îles du Havre aux Maisons, du Cap aux Meules et du Havre Aubert sont assez proches. L'évapotranspiration moyenne est respectivement de 434, 496 et 475 mm/an pour chacune de ces îles, représentant entre 42 et 48 % des précipitations annuelles. La recharge moyenne, respectivement de 589, 526 et 541 mm/an, oscille entre 51 à 57 % des précipitations annuelles. Le ruissellement est légèrement supérieur sur l'île du Havre Aubert (20 mm/an, soit 2 % des précipitations annuelles) par rapport aux îles du Havre aux Maisons et du Cap aux Meules (13 et 14 mm/an, respectivement, soit 1 % des précipitations annuelles), car on y retrouve davantage de zones humides.

Les îles de la Grande Entrée et Grosse Île ont un bilan hydrologique proche, avec une évapotranspiration moins élevée que sur l'île du Cap aux Meules et l'île du Havre Aubert (respectivement 456 mm/an et 441 mm/an). Ceci est directement dû à la végétation, celle-ci y est un peu moins développée et les forêts couvrent une moins grande partie du territoire. La recharge est donc supérieure sur ces îles que sur celle du Cap aux Meules et du Havre Aubert.

Le rôle de la végétation dans le bilan est également souligné par les bilans hydrologiques de l'île aux Loups et des autres petites îles rocheuses (hors île Brion). La végétation y est très peu développée, causant une faible évapotranspiration (respectivement 38 et 34 % des précipitations annuelles). Par conséquent ces îles présentent les recharges moyennes les plus importantes des îles de la Madeleine, avec 627 et 675 mm/an respectivement, représentant de 60 à 65 % des précipitations annuelles.

Sur les cordons dunaires également, la quasi-absence de végétation entraîne une faible part d'évapotranspiration dans le bilan hydrologique (35 % des précipitations annuelles, soit 367 mm/an). La présence de marais ou de marécages occasionne davantage de ruissellement que sur le reste du territoire, et celui-ci atteint 61 mm/an en moyenne (6 % des précipitations). La recharge qui en résulte s'approche des deux tiers des précipitations, avec 608 mm/an, soit 59 % des précipitations annuelles.

Au total sur le territoire étudié, l'évapotranspiration représente environ 42 % des précipitations (moyenne de 440 mm/an) alors que plus de la moitié (55 %) des précipitations participe à la recharge, soit 566 mm/an. La composante de ruissellement de surface dans le bilan hydrologique représente une part très faible des précipitations (3 %, soit 30 mm/an).

**Tableau 8.12 : Bilan hydrologique moyen annuel pour la période de juillet 1989 à juin 2019**

Île	Composante du bilan hydrologique en mm/an (% des précipitations)			
	Ruissellement de surface	Évapotranspi- ration	Recharge	Précipitations
De la Grande Entrée	<b>21</b> (2 %)	<b>456</b> (44 %)	<b>559</b> (54 %)	<b>1036</b> (100 %)
Grosse Île	<b>28</b> (3 %)	<b>441</b> (42 %)	<b>567</b> (55 %)	
Aux Loups	<b>17</b> (2 %)	<b>393</b> (38 %)	<b>626</b> (60 %)	
Du Havre aux Maisons	<b>13</b> (1 %)	<b>434</b> (42 %)	<b>589</b> (57 %)	
Du Cap aux Meules	<b>14</b> (1 %)	<b>496</b> (48 %)	<b>526</b> (51 %)	
Du Havre Aubert	<b>20</b> (2 %)	<b>475</b> (46 %)	<b>541</b> (52 %)	
D'Entrée	<b>5</b> (< 1 %)	<b>434</b> (42 %)	<b>597</b> (58 %)	
Autres îles rocheuses (sauf Brion)	<b>5</b> (1 %)	<b>356</b> (34 %)	<b>675</b> (65 %)	
Cordons dunaires	<b>61</b> (6 %)	<b>367</b> (35 %)	<b>608</b> (59 %)	
<b>Total</b>	<b>30</b> (3 %)	<b>440</b> (42 %)	<b>566</b> (55 %)	

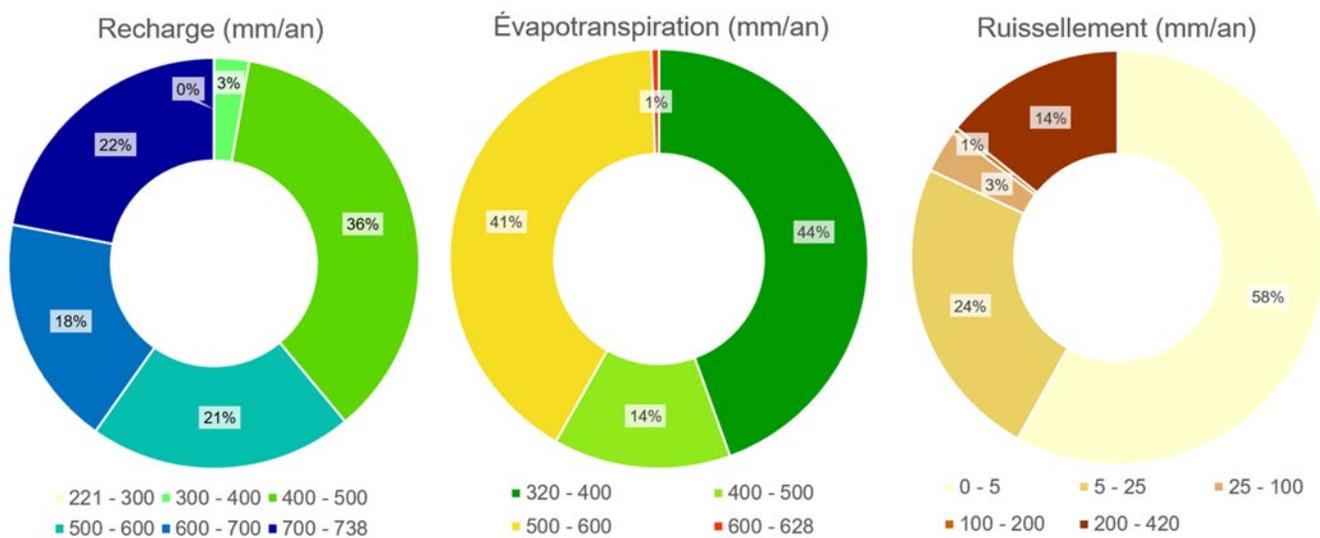
La Carte 27 : Recharge, en annexe électronique, et la Figure 8.19 présentent la moyenne de la recharge annuelle à une résolution spatiale de 20 m. La Carte 28 : Évapotranspiration (Figure 8.20) et la Carte 29 : Ruissellement de surface (Figure 8.21), en annexes électroniques, complètent le bilan hydrologique. Le modèle SWB2 combine les intrants spatiaux pour calculer ce bilan hydrologique. Le territoire sur lequel une recharge a pu être calculée est tributaire du territoire couvert par l'ensemble des intrants. Aussi certaines zones de dunes sont considérées comme « mer » ou « eau » dans les données d'utilisation du territoire ou de pédologie. Sur ces mailles, la recharge est considérée comme nulle et le bilan n'a pas été calculé. La Figure 8.18 montre la superficie du territoire occupé par intervalle de valeur pour chaque composante du bilan hydrologique.

La recharge sur le territoire d'étude varie de 221 à 738 mm/an (Figure 8.18), ce qui est élevé par rapport aux autres territoires des PACES du Québec, où la recharge moyenne peut varier entre 50 mm/an et 450 mm/an (MELCC, 2022a). Une faible imperméabilisation des surfaces et le bon drainage des sols entraînent un faible ruissellement et une recharge généralement élevée sur les îles de la Madeleine. La distribution spatiale de la recharge est très dépendante de la végétation : elle peut atteindre plus de 600 mm/an sur les territoires sans végétation qui sont soumis à une évapotranspiration plus faible que les zones boisées. C'est le cas pour 61 % du territoire (Figure 8.18), par exemple en zones résidentielles, où les habitations sont très espacées, avec peu de zones imperméables en surface (ex. : asphalte, toiture de maison) qui limiterait l'infiltration des précipitations dans le sol. Aussi, autour des maisons s'étend en

majorité une végétation herbeuse pour laquelle la transpiration des plantes est beaucoup plus faible qu'en forêt. En forêt, par exemple sur les buttes centrales des îles du Havre Aubert et du Cap aux Meules, la recharge est plus faible, variant de 400 à 500 mm/an. Cette gamme de valeur de recharge est retrouvée sur plus du tiers (36 %) du territoire. Les zones où la recharge est inférieure à 400 mm/an représentent seulement 3 % du territoire. Elles sont situées sur les routes ou autour des zones humides, où l'infiltration des précipitations est plus difficile.

L'évapotranspiration pour l'ensemble de l'archipel varie de 320 à 628 mm/an (Figure 8.20). Les zones qui présentent une végétation très peu développée, comme les landes ou le sol nu, sont caractérisées par une évapotranspiration de 400 mm/an ou moins, et couvrent plus de la moitié du territoire (Figure 8.18). C'est le cas notamment d'une grande partie des cordons dunaires. Les zones résidentielles se situent autour de la moyenne en termes d'évapotranspiration et composent la majorité des 14 % du territoire de la tranche 400 à 500 mm/an. Sur 45 % du territoire, l'évapotranspiration dépasse 500 mm/an. Il s'agit des zones boisées, comme au centre des îles du Cap aux Meules et du Havre-Aubert.

Le ruissellement varie de 0 à 420 mm/an à l'échelle des îles de la Madeleine (Figure 8.21). Sur plus de 80 % du territoire, le ruissellement est très faible, inférieur à 25 mm/an (Figure 8.18). Les taux de ruissellement les plus élevés (200 mm/an ou plus) sont caractérisés par la présence de route, ou de zones humides. C'est le cas ponctuellement sur l'île du Havre Aubert, mais également sur une partie des cordons dunaires.



**Figure 8.18 : Superficie du territoire occupée par intervalle de valeur pour chaque composante du bilan hydrologique de surface**

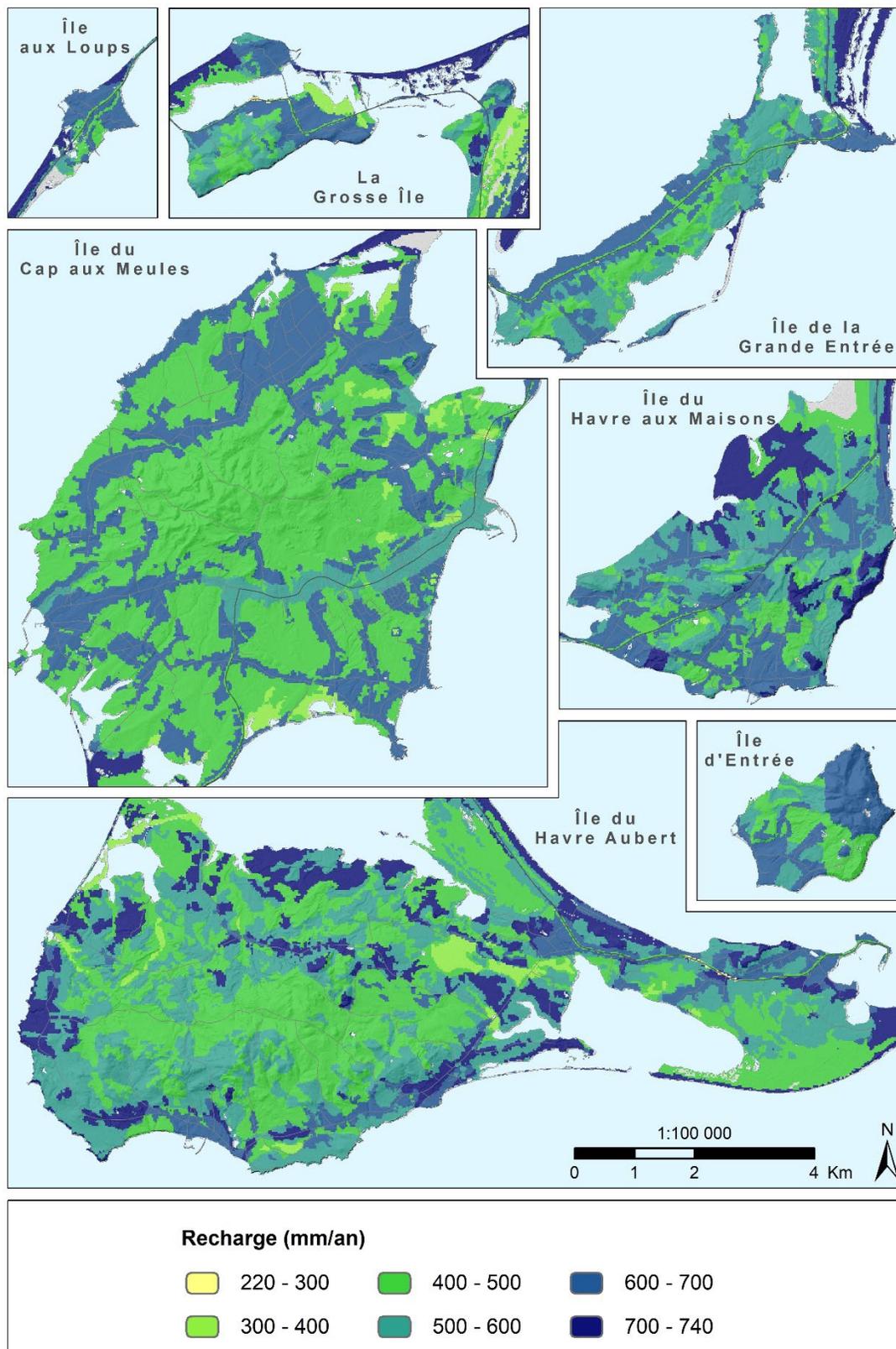


Figure 8.19 : Recharge annuelle

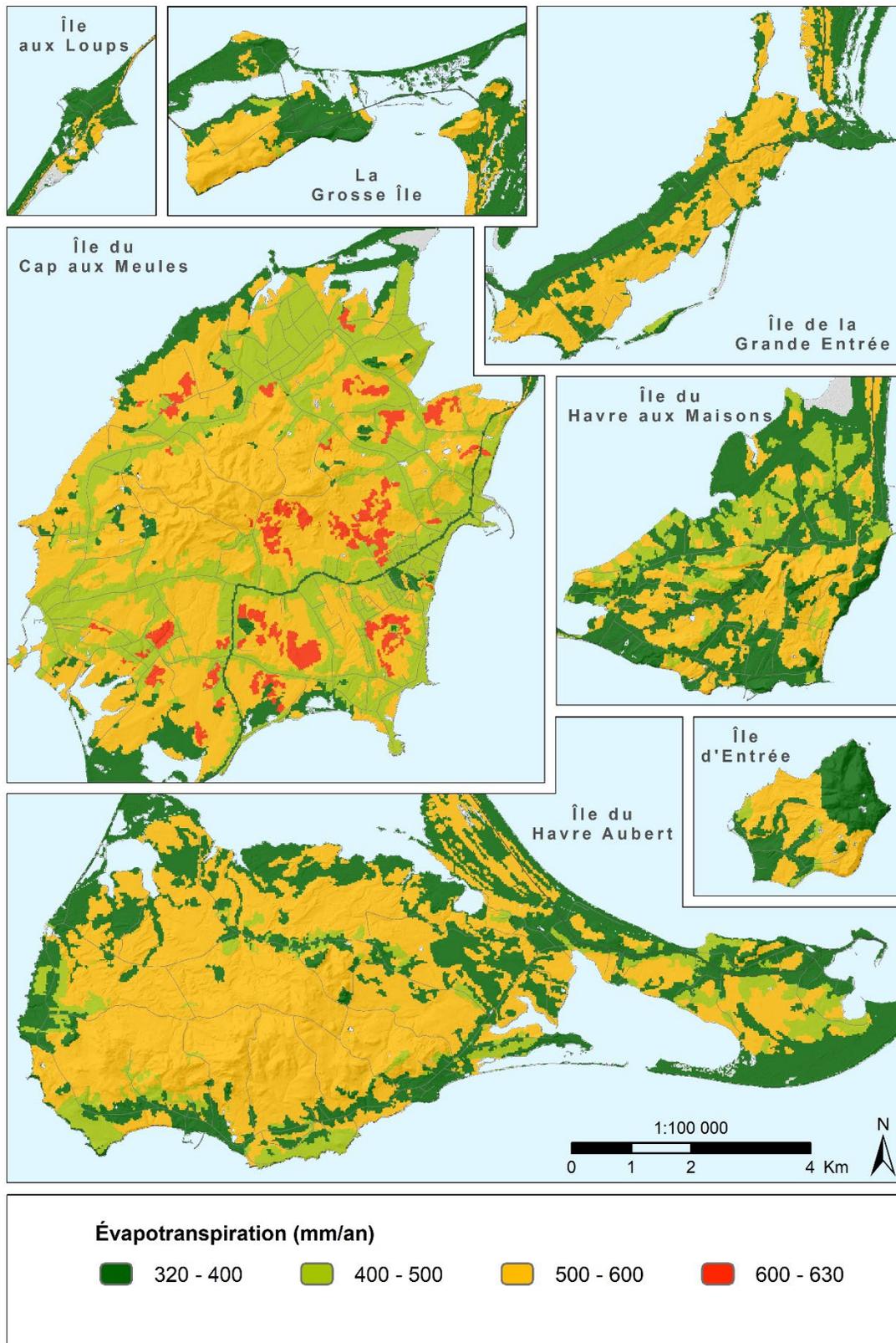


Figure 8.20 : Évapotranspiration annuelle

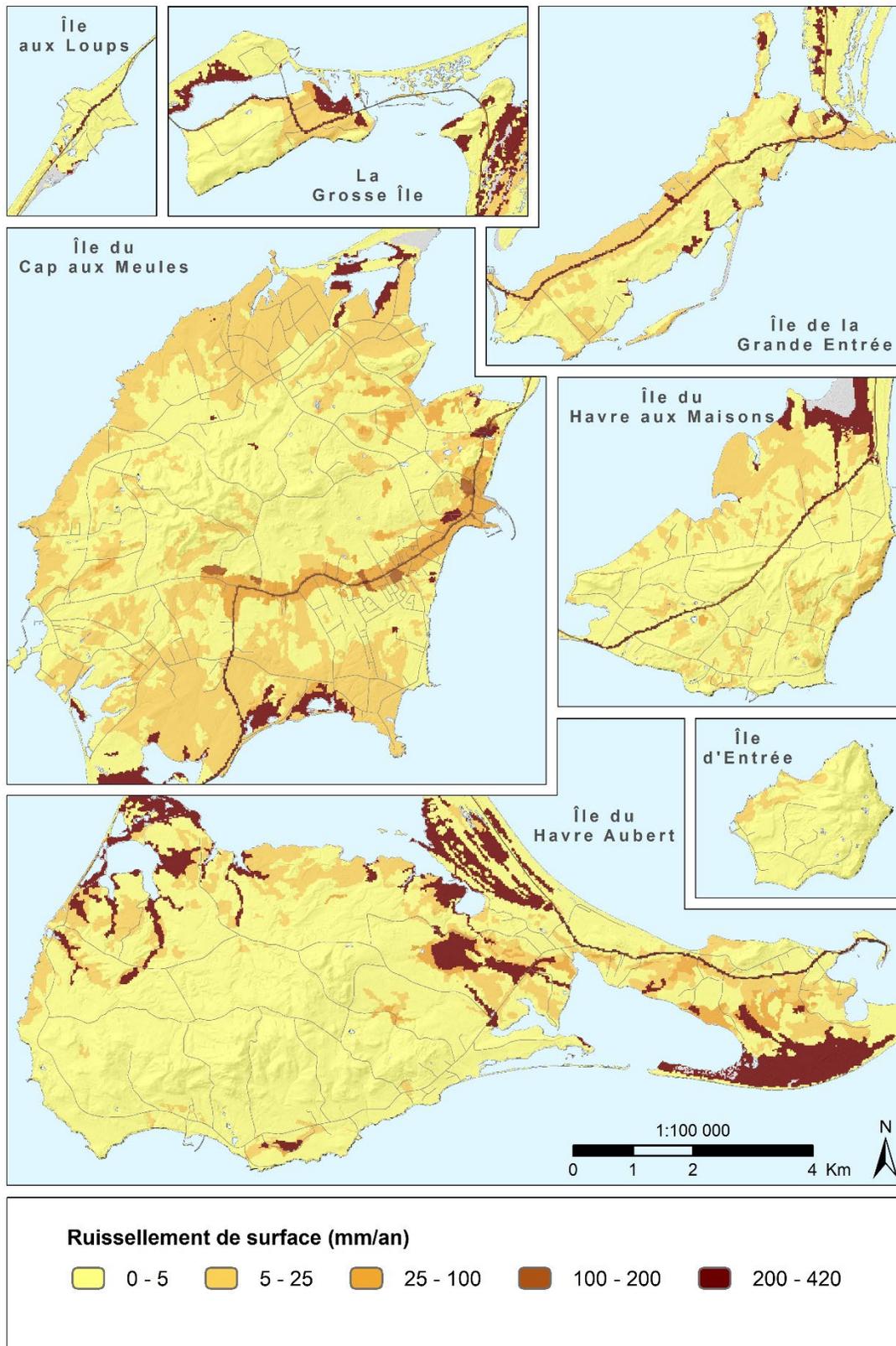


Figure 8.21 : Ruissellement de surface annuel

La variation interannuelle du bilan hydrologique de surface peut être évaluée à l'aide de la Figure 8.22, qui présente les valeurs mensuelles moyennes des composantes du bilan. Les résultats sont compatibles avec les observations qualitatives de recharge effectuées à partir des hydrogrammes de puits (Section 8.4.1).

Pendant les mois d'avril et de mai, la recharge printanière moyenne est la plus forte, et représente en moyenne 220 mm pour ces deux mois combinés, c'est-à-dire plus de 39 % de la recharge moyenne annuelle totale. Durant les mois estivaux (de juin à août), la recharge moyenne ne dépasse pas les 15 mm/mois. Elle remonte entre septembre et décembre, et atteint un maximum automnal de 70 mm/mois en moyenne en novembre. Au total sur ces quatre mois, la recharge dépasse légèrement les 200 mm, ce qui s'approche de la recharge printanière. De janvier à mars, la recharge demeure sous la barre des 25 mm/mois. En hiver, les précipitations liquides sont faibles (20 mm au total pour les trois mois), cependant les épisodes de fonte de neige font augmenter les apports verticaux à un total de 85 mm pour la période, soit 8 % des précipitations annuelles.

L'évapotranspiration est très basse de décembre à février, de moins de 10 mm/mois, due à l'absence d'activité végétale. Elle n'est pas nulle, car la composante « évaporation » est encore un peu active. La hausse des températures et le départ de la croissance des végétaux provoquent sa remontée au printemps pour atteindre une moyenne maximale de 73 mm/mois en juillet. L'évapotranspiration diminue ensuite graduellement sur toute la période automnale.

Le ruissellement demeure toujours très faible tout au long de l'année. La fonte printanière des neiges provoque une remontée notable du ruissellement en avril et mai, qui représentent ensemble 48 % du ruissellement annuel, avec 15 mm en moyenne.

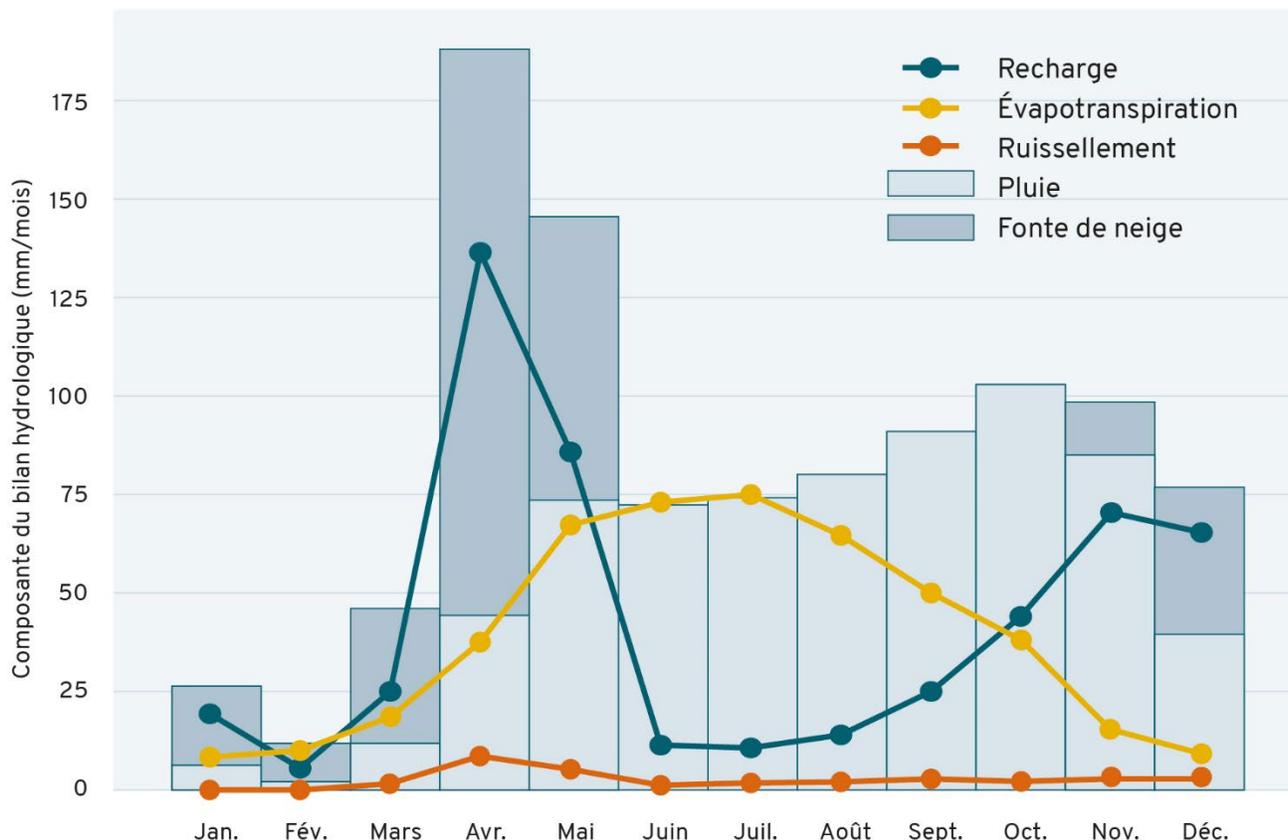


Figure 8.22 : Valeurs mensuelles moyennes des composantes du bilan hydrologique (1989-2019)

#### 8.4.3.2 Recharge projetée en 2050

Afin d'alimenter les modèles numériques visant l'élaboration de simulations d'exploitation durable de la ressource en eau souterraine qui prennent en considération l'effet des changements climatiques (Section 9.1.2), des projections futures de la recharge ont été effectuées. La recharge a été simulée à l'horizon 2050 sur les 72 scénarios climatiques fournis par Ouranos (Section 2.3.7.3). Les scénarios prévoient des augmentations médianes des températures minimales et maximales journalières de 1,1 et 1,0°C, respectivement, d'ici 2050. Les précipitations annuelles se verraient haussées de 33,5 mm selon le scénario climatique médian.

La Figure 8.23 représente l'évolution de la médiane de la recharge annuelle sur tout le territoire d'étude pour la période 2021-2050. La médiane des 72 scénarios présente une recharge de 554 mm/an en 2050, ce qui représente une baisse de 2 % comparativement à la recharge actuelle de 566 mm/an. Les scénarios minimal et maximal prévoient une recharge en 2050 respectivement de 278 mm/an (soit 49 % de la recharge actuelle) et de 929 mm/an (soit 164 % de la recharge actuelle). Les changements climatiques anticipés à l'horizon 2050 pourraient avoir des effets différents sur la recharge selon la saison. Un été plus chaud favoriserait l'évapotranspiration, donc diminuerait la recharge et au contraire, un hiver plus chaud favoriserait les phases de dégel, donc augmenterait la recharge. Les résultats du modèle basé sur le programme SWB2 montrent que l'effet de l'augmentation des températures prévue aurait très peu d'effet sur les valeurs annuelles de recharge.

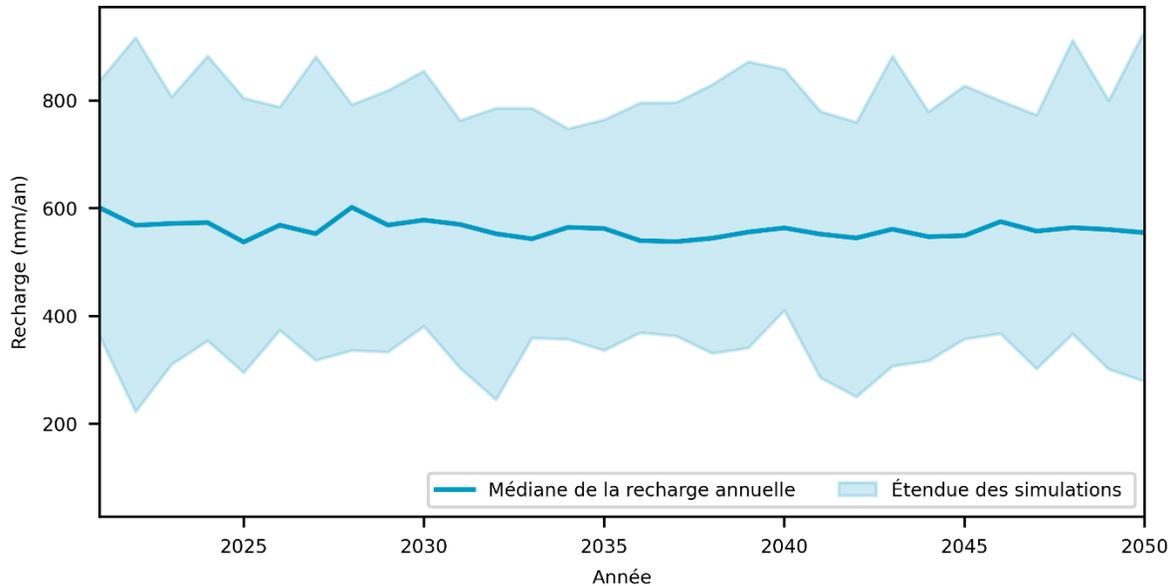
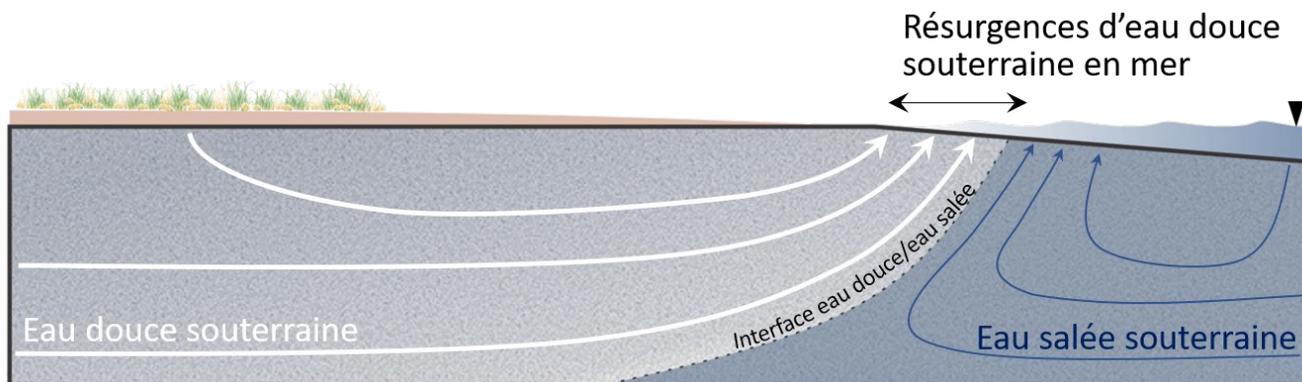


Figure 8.23 : Médiane de la recharge annuelle simulée entre 2021 et 2050 pour les 72 scénarios climatiques

#### 8.4.4 Résurgences

La Carte 30 : Résurgences d'eau souterraine, en annexe électronique, et la Figure 8.25, présentent les résurgences annuelles de l'eau souterraine douce, sur terre et en mer, sur une grille de 20 m par 20 m. Elles excluent les résurgences d'eau salée en mer, causées par la circulation de l'eau entre le milieu marin et le fond marin. Les résurgences sont obtenues des modèles d'écoulements souterrains basés sur le programme MODFLOW-2005 (Section 7.5). Sur terre, les résurgences interviennent si la nappe affleure, c'est-à-dire lorsque la charge hydraulique dépasse la surface du sol. En mer, l'eau douce souterraine fait résurgence près des côtes (Figure 8.24).



**Figure 8.24 : Schéma illustrant le contexte hydrogéologique à proximité de la côte. Les résurgences d'eau souterraine douce sont indiquées par les flèches blanches tandis que les résurgences d'eau salée souterraine sont illustrées par des flèches bleues**

Les résurgences sur terre se produisent sur environ 16 km<sup>2</sup>, soit 13 % du territoire terrestre modélisé. En moyenne, elles sont de 2 300 mm/an et environ 14 % du territoire avec résurgences dépassent 5 000 mm/an. Les résurgences les plus importantes se situent sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et du Havre Aubert, aux droits des cours d'eau permanents près des côtes. L'eau souterraine affleure fréquemment dans le fond des dépressions topographiques, ou au bas de fortes pentes, alimentant ainsi le réseau hydrographique de surface. Les résurgences sur terre semblent aussi être responsables de la formation ou du maintien de nombreux milieux humides, notamment dans les secteurs des tombolos et les zones de plus faible altitude en bordure de mer. Aucune résurgence n'apparaît sur l'île de la Grande Entrée, car le modèle numérique développé n'autorise pas de résurgence sur terre, mais seulement les résurgences en mer (Section 7.5.1).

Les résurgences d'eau douce en mer ont lieu autour des îles, sur une bande de quelques centaines de mètres, mais ne dépassant jamais 500 m des côtes. Au total pour l'archipel, elles couvrent environ 15 km<sup>2</sup> de territoire marin. En général, les résurgences en mer sont un peu plus faibles que celles sur terre, avec une moyenne de 1 900 mm/an. Seuls 9 % du territoire avec résurgences dépassent 5 000 mm/an. Les résurgences les plus fortes se retrouvent à la limite avec le milieu terrestre. Plus on s'éloigne des côtes, plus la lentille d'eau douce est fine et plus les résurgences d'eau douce diminuent.

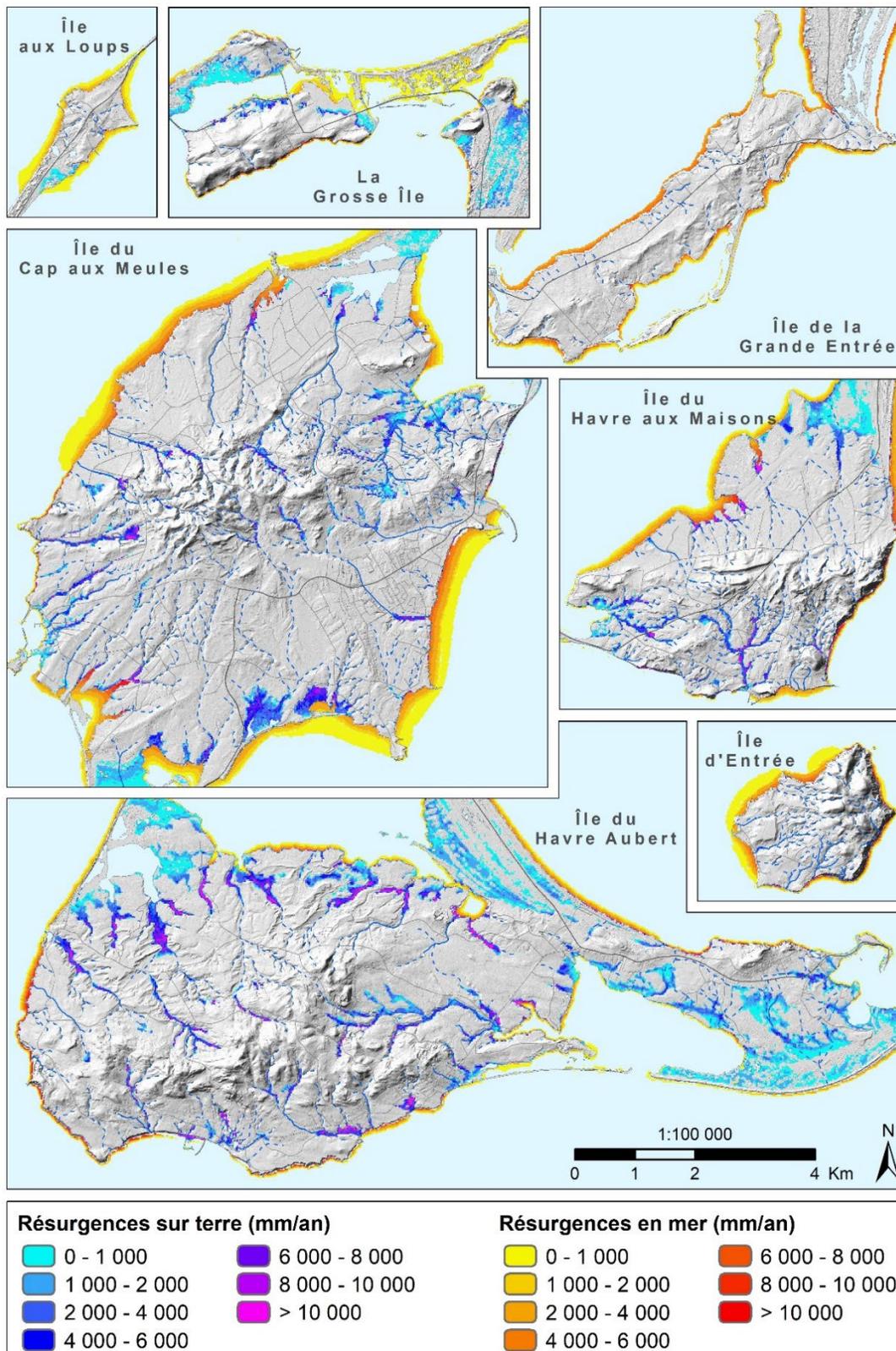


Figure 8.25 : Rééurgences en eau souterraine. Les cours d'eau permanent et intermittent sont aussi représentés (voir la Figure 2.6 pour la légende)

### 8.4.5 Bilan hydrologique détaillé

Le bilan hydrologique détaillé (Tableau 8.12), illustré dans la Figure 8.26, est une combinaison du bilan hydrologique de surface (issu du modèle basé sur SWB2, voir Tableau 8.12) et du bilan hydrologique souterrain (issu des modèles d'écoulements souterrains basés sur MODFLOW-2005). Les précipitations représentent l'intrant qui se partitionne en évapotranspiration, ruissellement de surface et en recharge. La quantité d'eau qui recharge les aquifères annuellement peut sortir du système sous forme de résurgences sur terre (quand la nappe est plus élevée que la surface du sol), résurgences en mer, ou pompage des puits municipaux (les pompages domestiques sont négligés).

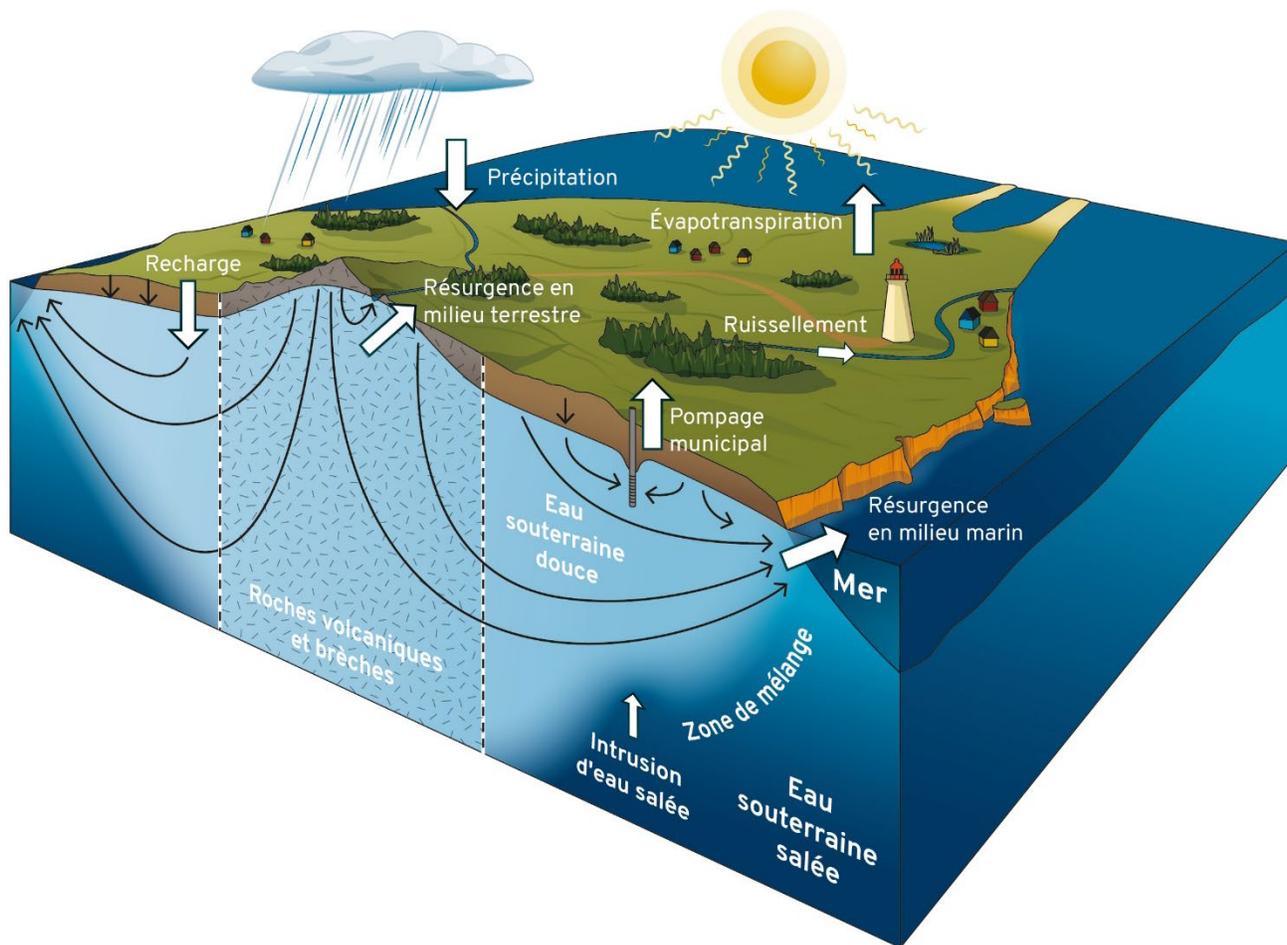


Figure 8.26 : Bloc-diagramme illustrant les composantes du bilan hydrologique détaillé

Les pompages municipaux représentent une part très faible du bilan, au maximum 2,3 % des précipitations sur l'île du Cap aux Meules, et en moyenne de 1,4 % seulement pour l'ensemble de l'archipel. La répartition spatiale des résurgences sur terre ou en mer est présentée à la Section 8.4.4. Leur part dans le bilan hydrologique détaillé semble dépendre de la taille de l'île et de son relief. Plus l'île a un réseau hydrographique développée (par exemple l'île du Havre Aubert), plus les résurgences sur terre prennent une part importante par rapport aux résurgences en mer (respectivement 39 % et 12 % des précipitations). Au contraire, sur les petites îles (par exemple les îles aux Loups et d'Entrée), la part

de résurgence sur terre est assez réduite par rapport à celles en mer (environ 10 % sur terre contre 50 % en mer environ).

**Tableau 8.13 : Bilan hydrologique annuel détaillé par île sur l'ensemble du territoire inclus dans les modèles d'écoulement souterrain**

Île	Composante du bilan hydrologique en mm/an (% des précipitations)					Précipitations
	Ruisselle- ment de surface	Évapotrans- piration	Recharge			
			Résurgences sur terre	Résurgences en mer	Pompages municipaux	
De la Grande Entrée	<b>21</b> (2 %)	<b>456</b> (44 %)	<b>0*</b> (0 %)	<b>556</b> (54 %)	<b>3</b> (< 1 %)	<b>1036</b> (100 %)
Grosse Île	<b>28</b> (3 %)	<b>441</b> (42 %)	<b>330</b> (32 %)	<b>237</b> (23 %)	<b>0</b> (0 %)	
Aux Loups	<b>17</b> (2 %)	<b>393</b> (38 %)	<b>104</b> (10 %)	<b>522</b> (50 %)	<b>0</b> (0 %)	
Du Havre aux Maisons	<b>13</b> (1 %)	<b>434</b> (42 %)	<b>299</b> (29 %)	<b>272</b> (26 %)	<b>18</b> (2 %)	
Du Cap aux Meules	<b>14</b> (1 %)	<b>496</b> (48 %)	<b>281</b> (27 %)	<b>221</b> (22 %)	<b>24</b> (2 %)	
Du Havre Aubert	<b>20</b> (2 %)	<b>475</b> (46 %)	<b>404</b> (39 %)	<b>128</b> (12 %)	<b>9</b> (1 %)	
D'Entrée	<b>5</b> (< 1 %)	<b>434</b> (42 %)	<b>110</b> (11 %)	<b>487</b> (47 %)	<b>0</b> (0 %)	
<b>Total**</b>	<b>17</b> (2 %)	<b>473</b> (46 %)	<b>304</b> (29 %)	<b>228</b> (22 %)	<b>14</b> (1 %)	

\* Dans le modèle d'écoulement souterrain de l'île de Grande Entrée, les résurgences sur terre ne sont pas considérées

\*\* Total du territoire inclus dans les modèles d'écoulement souterrain (excluant la majeure partie des cordons dunaires et les autres îles rocheuses)

La Figure 8.27 représente le bilan hydrologique global des îles de la Madeleine (représentation graphique de la dernière ligne du Tableau 8.13, c'est-à-dire le total du territoire inclus dans les modèles d'écoulement, excluant la majeure partie des cordons dunaires et les petites îles rocheuses non habitées). La figure illustre les principales conclusions que l'on peut tirer de l'analyse du bilan hydrologique détaillé. La quantité d'eau pompée aux îles de la Madeleine pour alimenter les réseaux d'aqueduc municipaux représente une très faible part du bilan hydrologique global (moins de 2 %). La recharge et l'évapotranspiration sont des composantes majeures du bilan, respectivement 52 % et 46 % des précipitations. Bien qu'une très petite part des précipitations ruisselle sans s'infiltrer (2 %), un réseau hydrographique de surface est tout de même développé aux îles de la Madeleine (Section 2.3.3). Localement, les eaux souterraines rechargées par les précipitations font résurgences et participent au maintien des cours d'eau ou des milieux humides. Ces résurgences représentent 29 % des précipitations annuelles. Une part de la lentille d'eau douce fait résurgence en mer (22 % des précipitations).

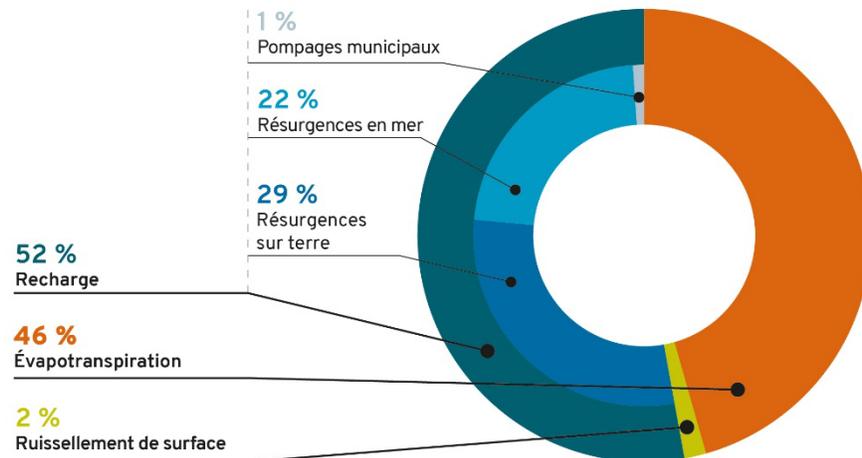


Figure 8.27 : Bilan hydrologique sur l'ensemble du territoire inclus dans les modèles d'écoulement souterrain. Les précipitations (pluie et neige) représentent 100 % des entrées d'eau dans le système

#### 8.4.6 Comparaison des volumes d'eau disponibles, rechargés et utilisés

Le Tableau 8.14 rapporte les volumes d'eau disponible, tels que présentés au Tableau 8.9 de la Section 8.3.4. Ceux-ci ont été obtenus de la multiplication du volume de la lentille d'eau douce par les porosités de drainage des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, soit ceux constitués des roches des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord et des dépôts meubles chenalisés. Ces volumes d'eau disponible sont comparés aux volumes d'eau qui rechargent annuellement ces mêmes aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé (Tableau 8.14). Cette recharge correspond à la somme de l'infiltration verticale à la surface de l'aquifère et de l'écoulement latéral provenant des aquifères adjacents situés en amont hydraulique. Les estimations annuelles des usages de l'eau totale, considérant les volumes consommés par tous les secteurs d'activité combinés (résidentiel, agricole, et industriel, commercial et institutionnel), estimés au Tableau 3.4 de la Section 3.2.1, sont aussi rapportées au Tableau 8.14. Les volumes d'eau distribués par les réseaux d'aqueduc de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Tableau 3.4 de la Section 3.2.1) sont aussi distingués (Tableau 8.14). Les usages totaux et les pompages municipaux annuels sont enfin comparés aux volumes de la recharge annuelle des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé (Tableau 8.14). Il est présumé que la très vaste majorité de l'eau consommée provient de ces aquifères, incluant la totalité de l'eau des réseaux de distribution municipaux, dont tous les puits prélèvent de l'eau dans les unités géologiques perméables formant ces aquifères.

Annuellement, le volume associé à la recharge annuelle est de  $49,0 \text{ Mm}^3$ , ce qui correspond à 1,8 % du volume total d'eau douce disponible de  $2 700 \text{ Mm}^3$  (Tableau 8.14). La recharge annuelle est proportionnelle à la superficie de l'île, c'est donc naturellement sur les plus grandes îles qu'elle est la plus élevée, avec  $19,1 \text{ Mm}^3$  pour l'île du Cap aux Meules et  $15,1 \text{ Mm}^3$  pour l'île du Havre Aubert. Toutefois, ces volumes ne représentent que 1,6 % du volume d'eau douce disponible de chaque île, ce qui les place parmi les plus faibles pour cette statistique. Seule la Grosse Île présente une part de son eau douce disponible rechargée annuellement encore plus faible de 1,5 %. Inversement, ce sont les îles de la Grande Entrée et aux Loups qui affichent les parts les plus élevées, dont 5,9 et 6,6 %,

respectivement, de leur eau disponible est rechargée annuellement. En effet, comme les lentilles d'eau douce y sont les plus minces (Section 8.3.3), le volume d'eau douce qu'elles contiennent par rapport à une unité de surface est plus faible que pour les autres îles.

La totalité de l'eau utilisée annuellement, tous usages confondus, s'élève à 2,2 Mm<sup>3</sup> (Tableau 8.14), dont 2,0 Mm<sup>3</sup> provient de l'exploitation des puits municipaux. Ces valeurs représentent 4,6 et 4,2 %, respectivement, du volume d'eau qui recharge annuellement les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. La proportion de l'eau consommée par rapport à l'eau douce disponible contenue dans la lentille d'eau douce n'est pas présentée au Tableau 8.14, car les valeurs sont extrêmement faibles (de moins de 0,1 % pour les îles combinées). C'est sur l'île du Cap aux Meules qu'ont lieu la majorité des usages, avec 1,4 Mm<sup>3</sup> d'eau consommée annuellement, ce qui représente 7,2 % de la recharge de cette île. L'exploitation des puits municipaux compte quant à elle pour 6,9 % de la recharge. La part la plus faible de la recharge consommée annuellement s'observe sur l'île de la Grande Entrée, avec 0,9 %.

**Tableau 8.14 : Comparaison des volumes d'eau douce disponible, de la recharge et de l'eau consommée**

Île	Eau douce disponible* (Section 8.3.4)	Recharge*	Usage de l'eau total (Section 3.2.1)	Pompages municipaux (Section 3.2.1)
	Volume (Mm <sup>3</sup> )	Volume annuel (Mm <sup>3</sup> /an) <i>Part du volume d'eau douce disponible rechargée annuellement</i>	Volume annuel (Mm <sup>3</sup> /an) <i>Part de la recharge* consommée annuellement</i>	Volume annuel (Mm <sup>3</sup> /an) <i>Part de la recharge* pompée annuellement</i>
De la Grande Entrée	76	4,5 (5,9 %/an)	0,04 (0,9 %)	0,03 (0,8 %)
Grosse Île	151	2,2 (1,5 %/an)	0,05 (2,3 %)	-
Aux Loups	9	0,6 (6,6 %/an)	0,02 (2,9 %)	-
Du Havre aux Maisons	311	6,2 (2,0 %/an)	0,29 (4,7 %)	0,29 (4,7 %)
Du Cap aux Meules	1 159	19,1 (1,6 %/an)	1,38 (7,2 %)	1,32 (6,9 %)
Du Havre Aubert	955	15,1 (1,6 %/an)	0,42 (2,8 %)	0,40 (2,7 %)
D'Entrée	54	1,3 (2,4 %/an)	0,03 (2,5 %)	-
<b>Total</b>	<b>2 715</b>	<b>49,0</b> (1,8 %/an)	<b>2,24</b> (4,6 %)	<b>2,04</b> (4,2 %)

\* Pour les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé seulement, tel que définis à la Section 8.2.5

## 8.5 Qualité de l'eau souterraine

La qualité de l'eau souterraine est l'une des préoccupations identifiées par les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine (Section 6). Elle s'évalue à partir d'analyses en laboratoire des différents composés microbiologiques (ex. : bactéries et virus) et chimiques (ex. : métaux, anions et cations majeurs) contenus dans des échantillons d'eau récoltés dans des puits. L'interprétation des données géochimiques a été distinguée selon deux ensembles de données, soit celles récoltées lors des campagnes de terrain dans la cadre de la présente étude et celles compilées à partir d'études antérieures dans la base de données hydrogéologiques.

Tel que mentionné à la Section 4.2.1, deux campagnes de terrain ont été réalisées par l'Université Laval à l'été 2019 et l'automne 2020, pour lesquelles un total de 48 échantillons et 5 résultats en duplicata ont été obtenus. Ces données sont nommées « Données terrain UL » dans les paragraphes qui suivent. Le calcul du bilan ionique a permis de vérifier que les échantillons sont électriquement neutres et ainsi s'assurer que l'interprétation du portrait géochimique n'est pas influencée par des échantillons ayant une information inappropriée. Sur les 48 échantillons prélevés, 24 présentent un bilan ionique entre  $\pm 10\%$  (Tableau 8.15) et ont été utilisés pour l'interprétation du type d'eau à la Section 8.5.1. Pour les autres échantillons, 23 ont un bilan ionique à l'extérieur de l'intervalle acceptable de  $\pm 10\%$  et un échantillon ne dispose pas d'assez de paramètres pour faire le calcul du bilan ionique. Bien qu'ils n'aient pas été utilisés pour déterminer le type d'eau à la Section 8.5.1, ils ont servi pour l'interprétation de la potabilité de l'eau à la Section 8.5.2.

Pour ce qui est des données provenant d'études antérieures compilées dans la base de données hydrogéologiques, elles sont nommées « Données BD » dans la suite du texte. Les résultats du système d'aqueduc correspondant à de l'eau prélevée aux réservoirs des différentes îles, rassemblant un mélange d'eau de plusieurs puits municipaux, n'ont pas été considérés. Les informations associées à l'eau salée, aux puits de surface et à certaines valeurs jugées moins fiables ont aussi été écartées. Il est à noter que les données provenant de profils de conductivité électrique, comptant pour 129 246 entrées dans la base de données hydrogéologiques, n'ont pas été conservées. Au final, 495 résultats d'échantillons ont été sélectionnés pour l'évaluation de la potabilité de l'eau à la Section 8.5.2. Parmi ceux-ci, seulement 59 (12 %) ont un bilan ionique situé dans l'intervalle  $\pm 10\%$  (Tableau 8.15) et ont été conservés pour l'interprétation du type d'eau à la Section 8.5.1.

Il importe de préciser que lorsque la valeur d'une analyse était sous le seuil de détection (ex. :  $< 0,01$  mg/L), la moitié de la valeur du seuil a été considérée lors des calculs statistiques (ex. :  $0,005$  mg/L). L'efficacité de cette technique a été démontrée par Farnham et coll. (2002).

**Tableau 8.15 : Nombre des données géochimiques utilisées**

Type d'échantillon	Données terrain UL	Données BD
Échantillons avec balance ionique $\leq \pm 10\%$	24 (50 %)	59 (12 %)
Échantillons avec balance ionique $> \pm 10\%$	23 (48 %)	31 (6 %)
Échantillons avec balance ionique non calculable	1 (2 %)	405 (82 %)
<b>Nombre total d'échantillons</b>	<b>48</b>	<b>495</b>

Note : UL = Université Laval ; BD = Base de données hydrogéologiques

### 8.5.1 Types d'eau

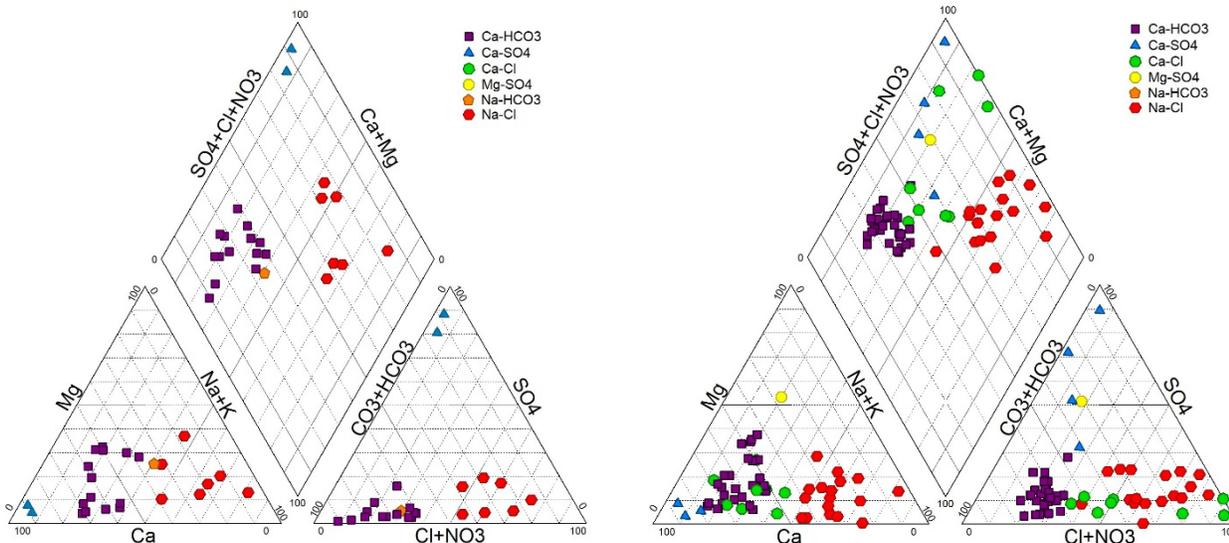
La détermination des types d'eau, ou faciès géochimiques permet de distinguer les échantillons selon leur degré d'évolution. Les eaux souterraines récemment infiltrées ont généralement une composition chimique proche de celle de l'eau de pluie, c'est-à-dire une faible minéralisation, de type Ca-HCO<sub>3</sub>. Lors de son écoulement dans l'aquifère, l'eau évolue, devenant progressivement minéralisée suite à la dissolution des minéraux présents dans les roches et les sédiments rencontrés. Un faciès de type Na-Cl représente une eau évoluée et différenciée ou une eau d'origine marine. Les autres faciès sont caractéristiques d'une eau en évolution, intermédiaire. Ainsi, les cations Ca évoluent vers les cations Mg-K puis Na, alors que les anions évoluent du HCO<sub>3</sub> au SO<sub>4</sub> puis Cl.

Les résultats obtenus pour l'analyse du type d'eau sont présentés au Tableau 8.16 et à la Figure 8.28. À noter pour les données BD, plusieurs résultats d'échantillons sont parfois issus du même puits. Les résultats sont similaires pour les échantillons de terrain de l'Université Laval et ceux provenant d'études antérieures compilés dans la base de données hydrogéologiques. La plupart des puits (59 et 46 %, respectivement) présente un faciès de type Ca-HCO<sub>3</sub>, représentatif d'eaux récentes, peu évoluées. Le type d'eau minéralisé Na-Cl est aussi très présent, avec 29 et 28 % des puits respectifs pour les données terrain UL et les données BD. Les types d'eau intermédiaires Na-HCO<sub>3</sub>, Ca-SO<sub>4</sub>, Ca-Cl, et Mg-SO<sub>4</sub>, constituent respectivement 12 et 26 % des puits pour les données terrain UL et les données BD.

**Tableau 8.16 : Résultats du type d'eau**

Types d'eau	Données terrain UL	Données BD	
	Nombre d'échantillons ou de puits (% du total)	Nombre d'échantillons (% du total)	Nombre de puits (% du total)
Ca-HCO <sub>3</sub>	14 (59 %)	29 (49 %)	21 (46 %)
Ca-SO <sub>4</sub>	2 (8 %)	4 (7 %)	4 (9 %)
Ca-Cl	-	8 (13 %)	7 (15 %)
Mg-SO <sub>4</sub>	-	1 (2 %)	1 (2 %)
Na-HCO <sub>3</sub>	1 (4 %)	-	-
Na-Cl	7 (29 %)	17 (29 %)	13 (28 %)
<b>Total</b>	<b>24 (100 %)</b>	<b>59 (100 %)</b>	<b>46 (100 %)</b>

Note : UL = Université Laval ; BD = Base de données hydrogéologiques



**Figure 8.28 : Types d'eau selon la méthode des diagrammes de Piper pour les données terrain UL (à gauche) et les données BD (à droite)**

La répartition spatiale des résultats de type d'eau est présentée à la Carte 31 : Qualité de l'eau selon les types d'eau, en annexe électronique, et à la Figure 8.29. L'eau semble généralement plus jeune dans le contexte géomorphologique des buttes centrales, notamment sur les îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons, là où le type d'eau Na-HCO<sub>3</sub> domine, typique d'une recharge plus récente (points en mauve sur la Figure 8.29). Cette tendance d'eau plus jeune s'observe aussi sur les plus petites îles, sans égard au contexte géomorphologique, où les écoulements souterrains seraient plus courts, comme sur les îles d'Entrée, de la Grosse Île et le secteur de La Grave sur l'île du Havre-Aubert. De l'eau plus évoluée, dominée par l'anion chlorure (points en rouge et en vert sur la Figure 8.29), s'observe parfois en bordure de la mer, tel qu'à l'île aux Loups, à l'île de la Grande Entrée, sur la Grosse Île et à l'île du Havre-Aubert. L'eau a pu se charger en minéraux dissous durant son lent parcours souterrain depuis sa recharge au centre des îles jusqu'à la côte. Une faible intrusion d'eau salée, due à la proximité du rivage ou à la faible profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Figure 8.15 de la Section 8.3.2), pourrait aussi expliquer ce phénomène. L'eau souterraine du secteur de l'Étang-du-Nord, sur l'île du Cap aux Meules, est aussi dominée par l'anion du chlorure. Par contre, comme les puits échantillonnés se trouvent éloignés de la rive et que l'interface eau douce – eau salée y est profonde (Figure 8.15 de la Section 8.3.2), un certain degré de contamination par les sels de voirie, tel que proposé par le Groupe Madelin'Eau (2004), est possible. En effet, tous les échantillons d'eau analysés dans ce secteur proviennent de puits se situant au sud du chemin de la Vernière (route 199) et du chemin de l'Étang-du-Nord, opérés par le MTQ, qui utilise environ 20 tonnes de sels de déglçage par kilomètre de tronçon de route chaque année (Section 6.2.4).

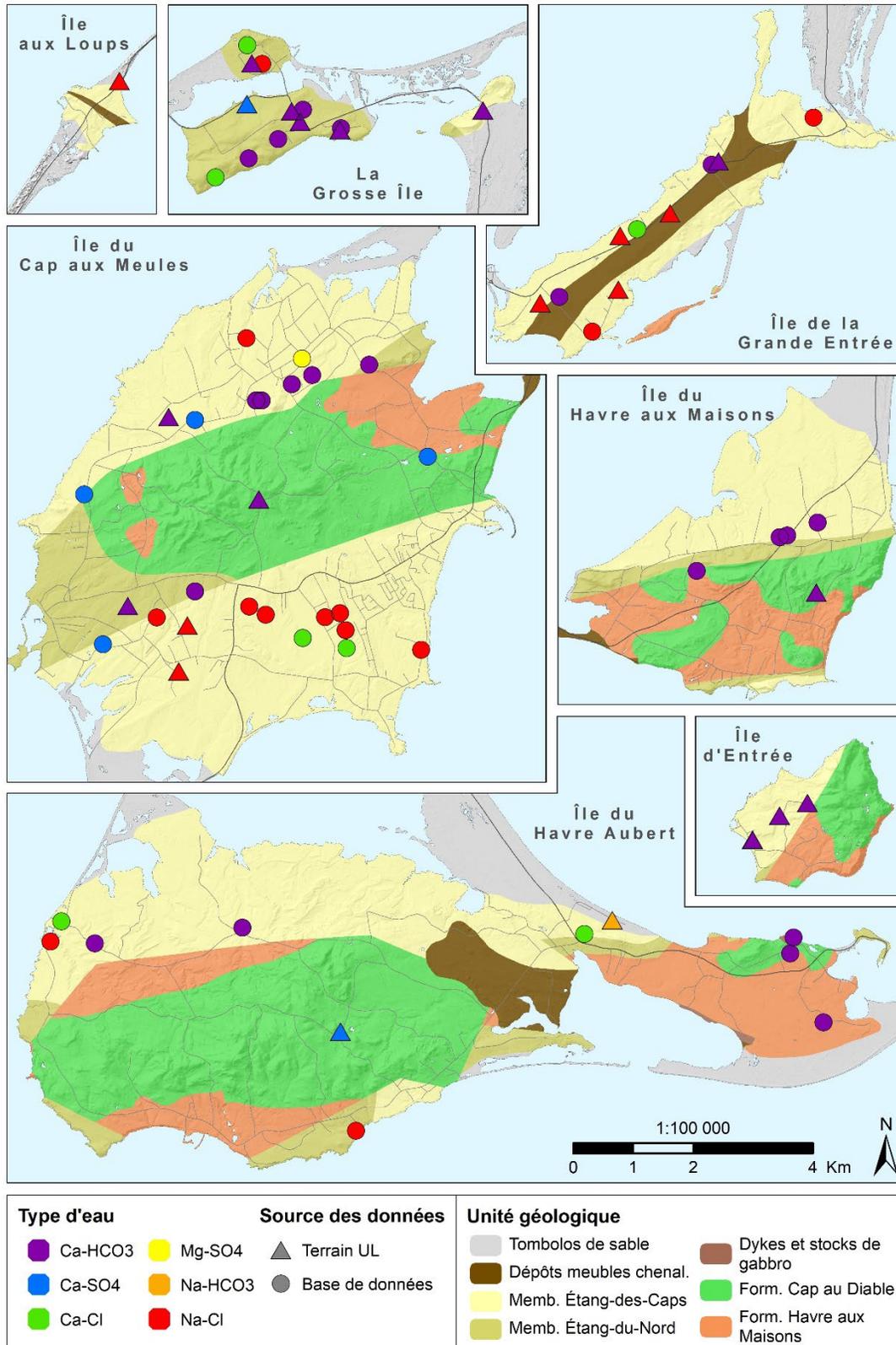


Figure 8.29 : Types d'eau

### 8.5.2 Potabilité de l'eau

Pour déterminer la potabilité de la ressource en eau souterraine, les résultats d'échantillonnage ont été comparés aux normes en vigueur au Québec, tel qu'établi par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40). Les résultats sont aussi comparés aux valeurs des objectifs esthétiques recommandées pour la qualité de l'eau potable par Santé Canada (2019a). Les différents paramètres évalués pour la qualité de l'eau sont listés ci-dessous. À noter que les échantillons ne présentent pas nécessairement une analyse pour tous ces paramètres, mais au moins pour un d'entre eux. Le nombre d'échantillons analysés pour chaque paramètre est aussi rapporté.

<u>Paramètre</u>	<u>Nombre d'échantillons</u>	<u>Paramètre</u>	<u>Nombre d'échantillons</u>
- Antimoine (Sb)	121	- Strontium (Sr)	65
- Arsenic (As)	134	- Sulfate (SO <sub>4</sub> )	231
- Baryum (Ba)	138	- Sulfures totaux	148
- Bore (B)	134	- Uranium (U)	129
- Cadmium (Cd)	134	- Zinc (Zn)	110
- Chlore (Cl)	391	- pH <i>in situ</i>	249
- Chrome (Cr)	134	- Température <i>in situ</i>	128
- Cuivre (Cu)	110	- Dureté totale	253
- Fer (Fe)	316	- Matière dissoute totale (MDT)	202
- Plomb (Pb)	123	- Turbidité	126
- Manganèse (Mn)	295	- Couleur vraie	114
- Mercure (Hg)	89	- Fluorure	159
- Nitrate (NO <sub>3</sub> )	32	- Coliformes totaux	311
- Nitrate-Nitrite (NO <sub>3</sub> -NO <sub>2</sub> )	327	- E.Coli	145
- Nitrite (NO <sub>2</sub> )	76	- Colonies/Bactéries atypiques	272
- Sélénium (Se)	134	- Bactéries entérocoques	183
- Sodium (Na)	240	- Virus coliphages	78

#### 8.5.2.1 Dépassements des normes de potabilité

Les normes de potabilité sont établies pour des substances pouvant avoir un impact sur la santé humaine. Les dépassements des normes observés des campagnes de terrain de l'Université Laval (de 2019 et 2020), et des données des études antérieures contenues dans la base de données hydrogéologiques (de 1963 à 2020), sont présentés au Tableau 8.17 et au Tableau 8.18, respectivement pour les paramètres inorganiques et microbiologiques. À noter que pour les données BD, plusieurs résultats d'échantillons sont parfois issus du même puits, ce qui fait que le nombre de puits non conformes peut être inférieur au nombre de dépassements. Les résultats sont localisés sur la Carte 32 : Dépassements des normes de potabilité de l'eau : paramètres inorganiques et la Carte 33 : Dépassements des normes de potabilité de l'eau : paramètres microbiologiques, en annexes électroniques. Ils sont aussi situés au Tableau 8.18 et Figure 8.31 pour les paramètres inorganiques et microbiologiques, respectivement.

Il est à noter que la présence de contaminants organiques (pesticides et hydrocarbures) dans l'eau souterraine n'a pas été évaluée dans le cadre du Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine.

### *Paramètres inorganiques*

Pour les paramètres inorganiques, on observe deux dépassements en plomb, deux dépassements en nitrate et nitrite et un dépassement en uranium, seulement pour les échantillons provenant des données BD.

Les dépassements en plomb ont été observés dans deux puits d'observation forés en 1992 dans le cadre de l'étude pour l'implantation du centre de gestion des matières résiduelle sur le cordon dunaire au nord de l'île du Havre aux Maisons (Section 6.2.3 – non visible à la Figure 8.30). Ces puits sont situés sur le site d'une sablière, qui constitue un endroit où la nappe est très vulnérable à la contamination (Section 6.2.5.2). L'entreposage de machineries ou des fuites accidentelles d'essence au plomb pourraient être la cause de ce genre de contamination. Il est à noter qu'un ancien dépotoir est aussi situé dans ce secteur, à quelques centaines de mètres au sud. Toutefois, il est peu probable, selon la direction d'écoulement de l'eau vers la mer, que des contaminants du dépotoir aient migré jusqu'aux deux puits d'observation. Le fondement sanitaire du plomb concerne principalement une réduction de l'intelligence chez les enfants, mesurée par une diminution du quotient intellectuel (Santé Canada, 2019a). Les effets possibles incluent aussi les effets comportementaux chez les enfants, une cognition réduite, une pression artérielle élevée et un dysfonctionnement rénal chez l'adulte. Les concentrations élevées en plomb dans l'eau de consommation proviennent fréquemment du relargage à partir du matériel de plomberie, comme les tuyaux, soudures, raccords en laiton et branchements en plomb (Santé Canada, 2019a).

Les dépassements en nitrate et nitrite ont été observés dans deux puits résidentiels à l'île d'Entrée et à l'île de la Grande Entrée (Tableau 8.18), avec des valeurs faiblement au-dessus de la norme de 10,0 mg/L, soit 10,9 et 11,6 mg/L respectivement. Le puits de l'île d'Entrée a été échantillonné une seconde fois quelques années plus tard et la concentration avait diminuée de plus de la moitié. Selon Santé Canada (2019a), le fondement sanitaire de la norme concerne la méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu) et les effets sur la fonction de la glande thyroïde chez les nourrissons alimentés au biberon.

Les nitrates et nitrites peuvent être d'origine naturelle, mais il est établi qu'une concentration plus élevée que 3 mg/L en nitrate et nitrite démontre l'influence de certaines d'activités humaines sur la qualité de l'eau, sans nécessairement avoir d'impact majeur sur la santé (INSPQ, 2019). L'utilisation de fertilisants synthétiques et de fumiers dans les zones agricoles ou la présence d'installations septiques déficientes dans les zones résidentielles peuvent être les causes de ces concentrations plus élevées (INSPQ, 2019). Pour les données terrain UL et les données BD, 4 résultats (8 %) et 76 résultats (28 %) ont des concentrations respectivement entre 3 et 10 mg/L en nitrate et nitrite (Tableau 8.17). Compte tenu de l'agriculture peu intensive aux îles de la Madeleine (Section 6.2.6), il est plus probable que les installations septiques soient responsables de ces concentrations. Près du tiers de ces installations ont d'ailleurs été jugées non conformes par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Section 6.2.2.1). Les installations septiques sont aussi beaucoup plus nombreuses sur les îles sans système d'égout sanitaire (la Grosse Île, île de la Grande Entrée, île d'Entrée et île aux Loups – Section 6.2.2.2).

Le fondement sanitaire pour l'uranium concerne des effets sur les reins et son origine est fréquemment naturelle, provenant de l'érosion des roches et des sols (Santé Canada, 2019a). Le seul dépassement aux îles de la Madeleine a été observé dans un puits municipal de l'île du Cap aux Meules (Tableau 8.18), lors d'un échantillonnage réalisé en 1993. La valeur mesurée de 0,067 mg/L semble être un résultat aberrant et pourrait s'agir d'une erreur de manipulation ou de laboratoire, car la deuxième valeur

la plus élevée parmi les 129 échantillons (données terrain UL et données BD combinées) est de 0,007 mg/L, soit environ un ordre de grandeur plus faible et très près du seuil de détection de 0,005 mg/L. De plus, les concentrations en uranium des échantillons prélevés dans le système d'aqueduc de l'île du Cap aux Meules sont toutes sous le seuil de détection.

**Tableau 8.17 : Sommaire des dépassements des normes de potabilité – paramètres inorganiques (en mg/L)**

Paramètres	Norme <sup>a</sup>	Données terrain UL							Données BD						
		Nombre échantillons	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes	Nombre échantillons	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes
<b>Plomb (Pb)</b>	<b>0,01</b>	47	0,0005	0,0005	0,0005	0	0 %	0	76	0,0005	0,0005	0,0025	2	3 %	2
<b>Nitrate (NO<sub>3</sub>) et Nitrite (NO<sub>2</sub>)</b>	<b>10</b>	48	0,11	0,80	2,03	0	0 %	0	279	0,78	1,96	3,37	2	1 %	2
	<b>3<sup>b</sup></b>					4	8 %	4					78	28 %	57
<b>Uranium (U)</b>	<b>0,02</b>	47	0,0005	0,0005	0,0005	0	0 %	0	82	0,0025	0,0025	0,0050	1	1 %	1

<sup>a</sup> Norme à ne pas dépasser d'après le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40).

<sup>b</sup> Concentration au-delà de laquelle l'influence d'activités humaines est indéniable, mais qui ne correspond pas à une norme.

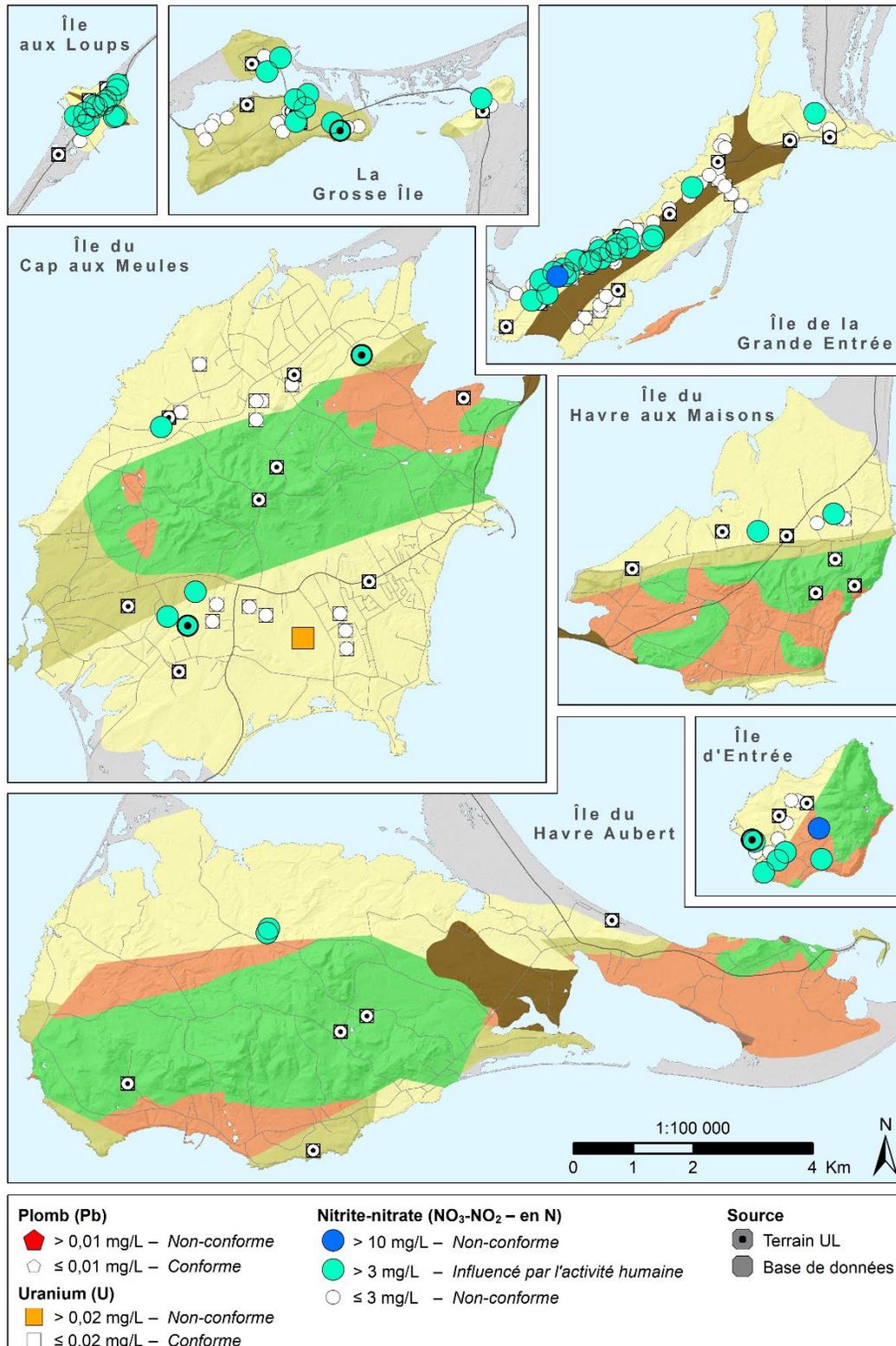


Figure 8.30 : Dépassements des normes de potabilité pour les paramètres inorganiques (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8). À noter que quelques puits sont absents sur la figure, car ils sont situés sur les cordons dunaires

### *Paramètres microbiologiques*

Pour les paramètres microbiologiques, plusieurs dépassements ont été observés pour les coliformes totaux, E.Coli, les bactéries atypiques et entérocoques et les virus coliphages. Les puits non conformes sont répartis sur toutes les îles principales (Figure 8.31). À noter qu'aucun dépassement n'a été observé dans les puits d'eau potable actuellement opérés par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine.

Les proportions des dépassements sont nettement plus élevées pour les données terrain UL que pour les données BD (Tableau 8.18). Au total ce sont 20 puits différents qui ne sont pas conformes pour les 44 échantillons des données UL, ce qui représente 45 % des puits. Pour les 271 échantillons de la BD, seuls 19 puits sont non-conformes, correspondant à 7 % des puits échantillonnés. L'écart entre les deux sources de données peut s'expliquer entre autres par la présence de nombreux échantillons d'eau qui proviennent de puits non utilisés, et donc non entretenus, pour les données terrain UL, alors que les puits des données BD étaient majoritairement en utilisation lors de leur échantillonnage. De plus, plusieurs échantillons des données BD proviennent d'eau extraite à la suite d'essais de pompage, ce qui permet purger l'eau durant un certain temps, limitant ainsi les chances de contamination.

Les dépassements les plus nombreux sont au niveau des coliformes totaux, jusqu'à 30 % des échantillons pour les données terrain UL. Toutefois, ils ne représentent pas nécessairement un risque immédiat pour la santé, car ils comprennent les bactéries issues de la matière fécale, mais aussi celles provenant du sol et de la végétation (INSPQ, 2019). Ces dernières ne sont pas nécessairement insalubres.

Les bactéries atypiques sont des bactéries non identifiables et, en quantité trop élevée, peuvent nuire au dénombrement des autres paramètres microbiologiques (INSPQ, 2019). Dans les données BD, sept dépassements (3 %) ont été observés, comparativement à six (14 %) pour les données terrain UL.

Une détection d'E. coli indique une récente contamination fécale et que des microorganismes pouvant provoquer des maladies gastro-intestinales sont probablement présents (Santé Canada, 2019a). Les résultats pour E. Coli sont identiques à celles des bactéries atypiques pour les données terrain UL, alors que la norme n'est dépassée que pour un seul échantillon provenant des données BD (1 – 1 %).

Les bactéries entérocoques ont été observées dans quatre puits (9 %) des données terrain UL et 1 puits des données BD. Selon Santé Canada (2019a), ils sont généralement associés à des troubles gastro-intestinaux (ex. : nausées, vomissements, diarrhée).

Enfin, au moins un virus coliphage a été détecté dans un seul échantillon des données terrain UL. Les considérations sanitaires décrites par Santé Canada (2019a) sont similaires aux bactéries entérocoques.

De manière générale, les contaminations des paramètres microbiologiques peuvent être sporadiques et présenter des variations saisonnières (Ministère de l'Environnement, 2004). Ils sont plus propices à se produire lors d'épisodes de recharge, notamment durant la fonte printanière. La présence de coliformes totaux peut aussi révéler la vulnérabilité de l'ouvrage de captage aux intrusions d'eau de surface, par exemple par un mauvais scellement du puits. Il n'est pas possible de juger sur ces aspects à l'aide de la présente analyse. Les bactéries d'origine fécales (ex. : E. Coli, bactéries entérocoques) peuvent provenir de fosses septiques non conformes ou d'élevages d'animaux à proximité du puits (INSPQ, 2019). Cette dernière source de contamination s'avère plus probable, car l'agriculture n'est pas pratiquée de façon

intensive (Section 6.2.6) et près du tiers des installations septiques de la Communauté maritime Les-Îles-de-la-Madeleine sont jugées non conformes (Section 6.2.2.1).

**Tableau 8.18 : Sommaire des dépassements des normes de potabilité – paramètres microbiologiques (nombre/100 ml)**

Paramètres	Norme <sup>a</sup>	Données terrain UL				Données BD			
		Nombre échantillons	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes	Nombre échantillons	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes
Coliformes totaux	10	44	13	30 %	13	271	11	4 %	11
Bactéries atypiques	200	44	6	14 %	6	228	7	3 %	7
E. Coli	0	44	6	14 %	6	101	1	1 %	1
Bactéries entérocoques	0	44	4	9 %	4	139	1	1 %	1
Virus coliphages	0	44	1	2 %	1	34	0	0 %	0

<sup>a</sup> Norme à ne pas dépasser d'après le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40).

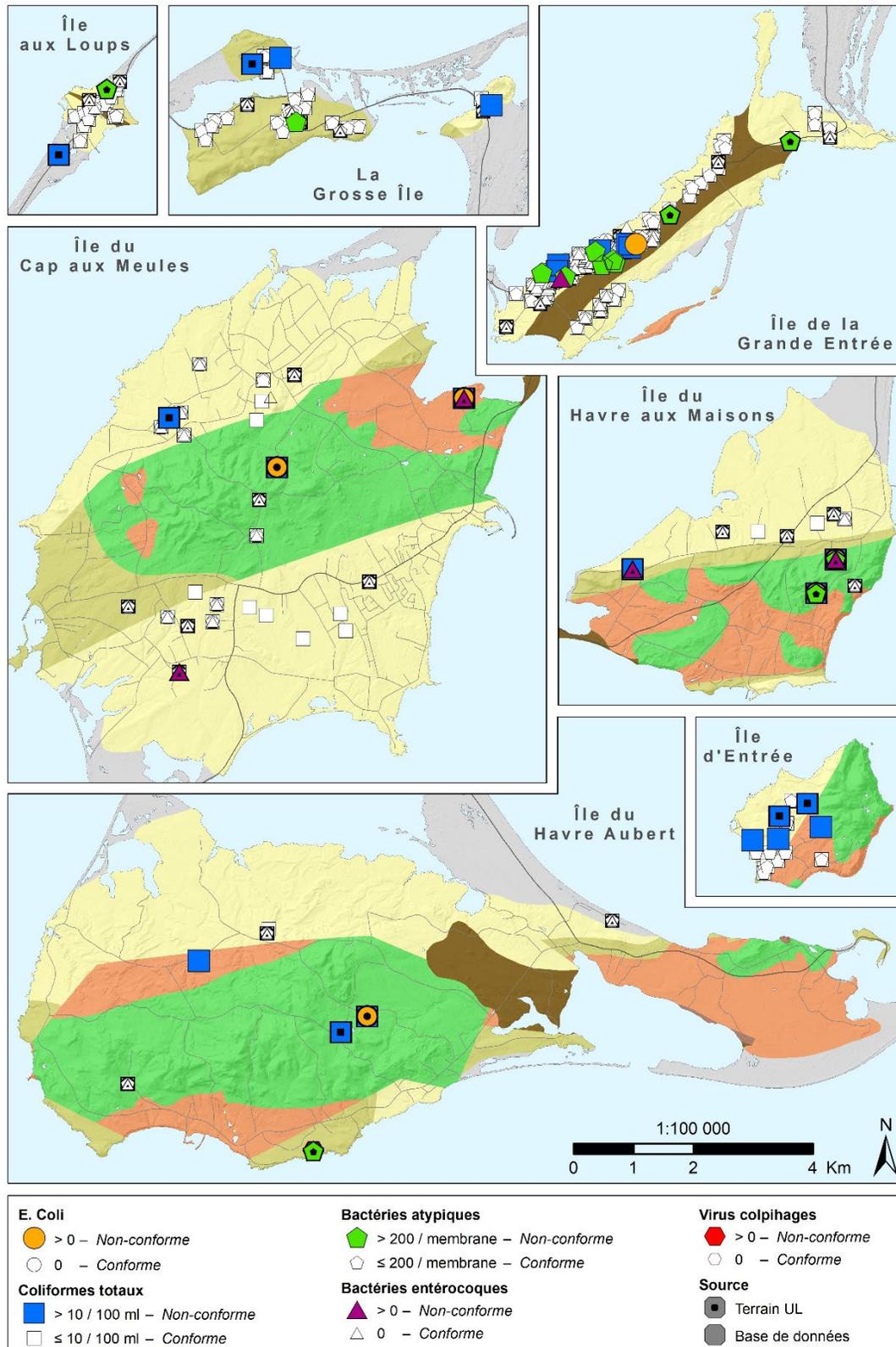


Figure 8.31 : Dépassements des normes de potabilité pour les paramètres microbiologiques (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8)

### **8.5.2.2 Dépassement des objectifs esthétiques**

Les objectifs esthétiques sont déterminés selon des considérations esthétiques et organoleptiques, pouvant affecter, par exemple, le goût, l'odeur ou la couleur de l'eau, sans toutefois représenter de danger pour la santé humaine. Ces objectifs incluent aussi les paramètres pouvant entraîner la corrosion ou l'entartrage des puits ou accessoires de la plomberie. Les dépassements des objectifs esthétiques observés sont présentés au Tableau 8.19. À noter que plusieurs échantillons des données BD sont parfois issus du même puits. Les résultats sont localisés sur la Carte 34 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : sodium (Na) et chlorure (Cl), la Carte 35 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : fer (Fe) et manganèse (Mn), la Carte 36 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : sulfure (S) et sulfate ( $\text{SO}_4$ ), et la Carte 37 : Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : pH et matière dissoute totale, en annexes électroniques. Les puits échantillonnés sont aussi situés pour les mêmes paramètres aux Figure 8.32, Figure 8.33, Figure 8.34 et Figure 8.35, respectivement.

Des dépassements pour le chlorure, le fer, le manganèse, le sodium, les sulfates, les sulfures totaux, le pH et les matières dissoutes totales ont été observés. Les dépassements les plus nombreux, mesurés dans plus de 10 % des échantillons, concernent le fer, le manganèse, le pH et les matières dissoutes totales (Tableau 8.19).

**Tableau 8.19 : Sommaire des dépassements des objectifs esthétiques (en mg/L)**

Paramètres	OE <sup>a</sup>	Données terrain UL							Données BD						
		Nombre échantillons	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes	Nombre échantillons	Quartile 25	Quartile 50	Quartile 75	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements	Nombre de puits non conformes
Chlorure (Cl)	250	48	38,75	56,50	90,50	3	6 %	3	343	35	56,8	95	16	5 %	14
Sodium (Na)	200	47	19,85	30,3	42,95	2	4 %	2	193	18,9	24	30	3	2 %	2
Fer (Fe)	0,3	47	0,05	0,05	0,1	8	17 %	8	269	0,025	0,03	0,1	38	14 %	34
Manganèse (Mn)	0,02	47	0,0015	0,004	0,076	16	34 %	16	248	0,001	0,006	0,04	94	38 %	74
	10					21 %	10	42					17 %	36	
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	500	48	7,875	11,3	21,25	4	8 %	4	183	9	13	23	3	2 %	2
Sulfures (S)	0,05	47	0,01	0,01	0,01	1	2 %	1	101	0,01	0,01	0,01	3	3 %	3
Matière dissoute totale	500	41	237,6	328,9	604,5	12	29 %	12	161	140	210	350	14	9 %	11
pH	6,5 – 8,5 <sup>c</sup>	41	6,18	6,96	7,35	12	29 %	12	208	6,9	7,3	7,6	27	13 %	18

<sup>a</sup> Objectifs esthétiques des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada de Santé Canada (2019a).

<sup>b</sup> Concentration maximale acceptable pour des considérations pour la santé selon Santé Canada (2019a).

<sup>c</sup> Selon le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40).

Les dépassements pour le chlorure (Cl) représentent respectivement 6 et 5 % des échantillons des données terrain UL et des données BD (Tableau 8.19). Pour le sodium (Na), les dépassements respectifs sont de 4 et 2 %. Pour trois des quatre puits dont l'objectif esthétique du sodium est dépassé, un dépassement en chlorure est aussi constaté. Un de ces dépassements n'est pas visible sur la Figure 8.32, car il est localisé sur le cordon dunaire au nord de l'île du Havre aux Maisons. Les objectifs esthétiques de ces paramètres sont fondés essentiellement sur le goût, mais aussi sur la possibilité de corrosion du réseau de distribution (Santé Canada, 2019a). Leur origine peut être naturelle, comme une intrusion d'eau salée, ou anthropique, comme l'utilisation de sels de déglçage (Section 6.2.4). Aux îles de la Madeleine, conformément au type d'eau évolué Na-Cl (Section 8.5.1), on observe ces dépassements en majorité près des côtes, ce qui laisse suggérer une intrusion d'eau salée.

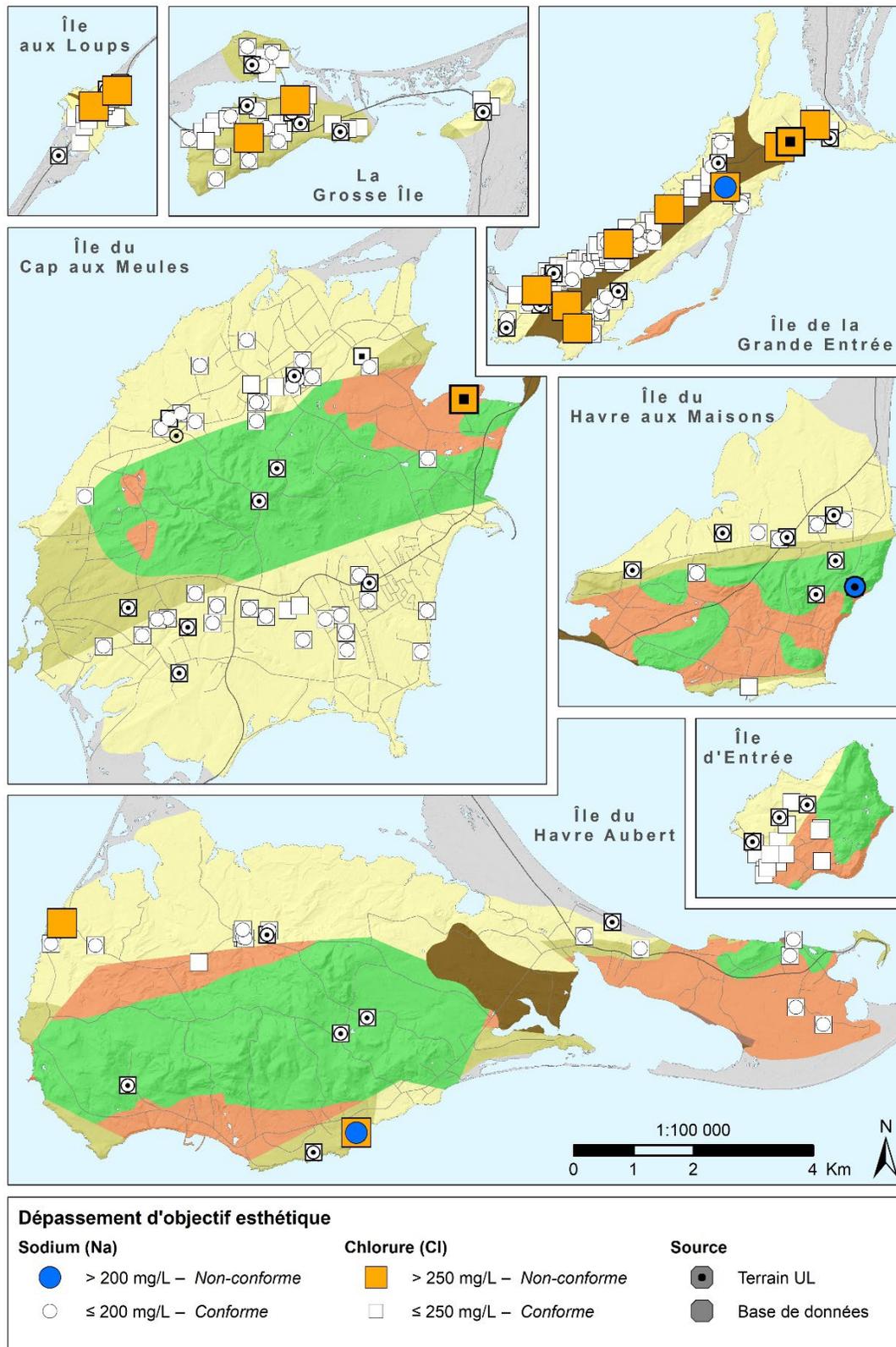


Figure 8.32 : Dépassements des objectifs esthétiques pour le chlorure (Cl) et le sodium (Na) (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8)

Des dépassements en fer (Fe) viennent affecter le goût de l'eau, et créent des taches sur la lessive et les accessoires de plomberie (Santé Canada, 2019a). Ces dépassements sont présents principalement dans les grès des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord (Figure 8.33). Ils sont particulièrement nombreux sur la Grosse Île, sur l'île de la Grande Entrée et dans le secteur de Fatima, sur l'île du Cap aux Meules. Leur origine pourrait être attribuable aux minéraux ferreux contenus dans la roche. Les résultats indiquent que les puits ayant des dépassements en fer présentent souvent des dépassements en manganèse (7 des 8 dépassements en fer des données terrain UL et 31 des 38 dépassements en fer des données BD).

Selon Santé Canada (2019a), les dépassements en manganèse (Mn) supérieurs à 0,02 mg/L entraîne une coloration du linge, mais des effets sur la santé sont possibles pour des valeurs excédants 0,12 mg/L, tel que des effets sur le développement et le comportement neurologiques, ainsi que des déficits de mémoire, d'attention et de motricité. Les nourrissons nourris au lait maternisé peuvent être particulièrement à risque. À ce jour, la réglementation du gouvernement du Québec n'inclut pas ce critère. Ainsi, 34 et 38 % des échantillons des données terrain UL et des données BD respectivement, présentent des dépassements supérieurs à 0,02 mg/L (Tableau 8.19). Si on considère le seuil de 0,12 mg/L, les proportions respectives des dépassements sont de 21 et 17 %. Les dépassements sont particulièrement importants pour la Grosse Île, où 2 puits sur 6 des données terrain UL et 11 puits sur 17 des données BD dépassent ce seuil. Les secteurs de Fatima sur l'île du Cap aux Meules, de La Grave sur l'île du Havre Aubert et l'ensemble de l'île de la Grande Entrée montrent aussi des dépassements fréquents, mais ces secteurs sont aujourd'hui desservis par des réseaux d'alimentation en eau potable municipaux (Figure 8.33). Les activités humaines responsables d'une teneur élevée en manganèse dans l'eau seraient les rejets industriels, les activités minières et le lessivage des sites d'enfouissement (Santé Canada, 2019a). Ces activités sont peu ou pas présentes dans les secteurs des puits touchés, il est donc plutôt supposé que l'origine de ces contaminations serait due à la dissolution de minéraux naturels riches en manganèse.

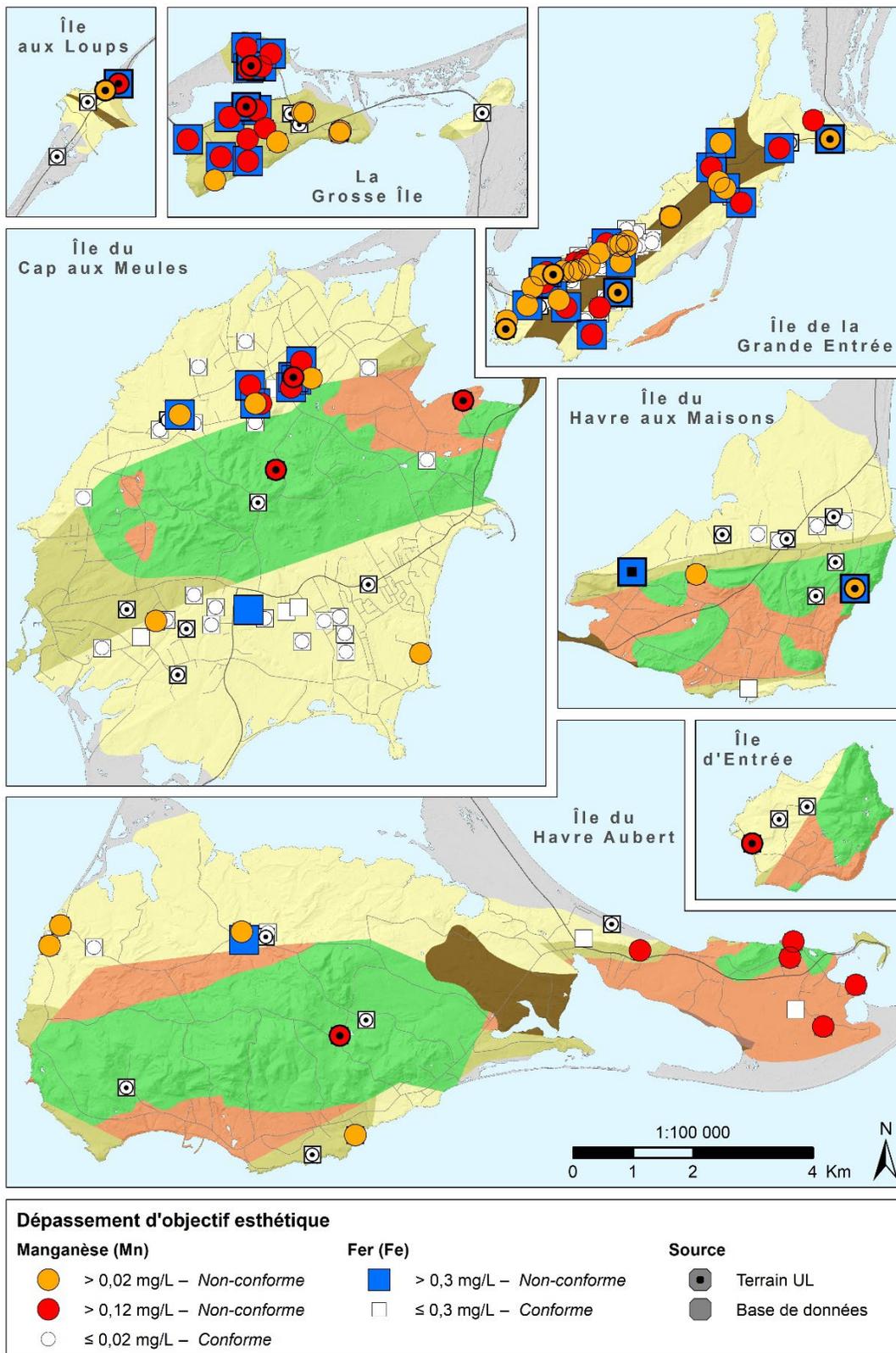


Figure 8.33 : Dépassements des objectifs esthétiques pour le fer (Fe) et manganèse (Mn) (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8)

Des dépassements en sulfate ( $\text{SO}_4$ ) ont été observés dans quatre puits résidentiels des données terrain UL et trois puits d'exploration des données BD (Tableau 8.19). Ce paramètre peut affecter le goût de l'eau et causer la diarrhée et la déshydratation (Santé Canada, 2019a). Les dépassements sont observés sur les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules et la Grosse Île (Figure 8.34). Santé Canada (2019a) propose une origine de ce contaminant de déchets industriels, mais ceci n'a pas été investigué pour les îles de la Madeleine.

Trois puits des données BD et un puits des données terrain UL dépassent l'objectif esthétique des sulfures totaux (S) (Tableau 8.19), ce qui a comme conséquence d'altérer le goût et l'odeur de l'eau (Santé Canada, 2019a). Trois de ces puits sont situés sur les îles du Havre Aubert, du Cap aux Meules et de la Grande Entrée, tandis que le quatrième se trouve sur un cordon dunaire et n'est pas à la Figure 8.34. Trois des puits ne sont pas en activité ou l'eau n'est pas consommée. L'autre dépassement provient d'un échantillon récolté dans un puits municipal lors d'un essai de pompage.

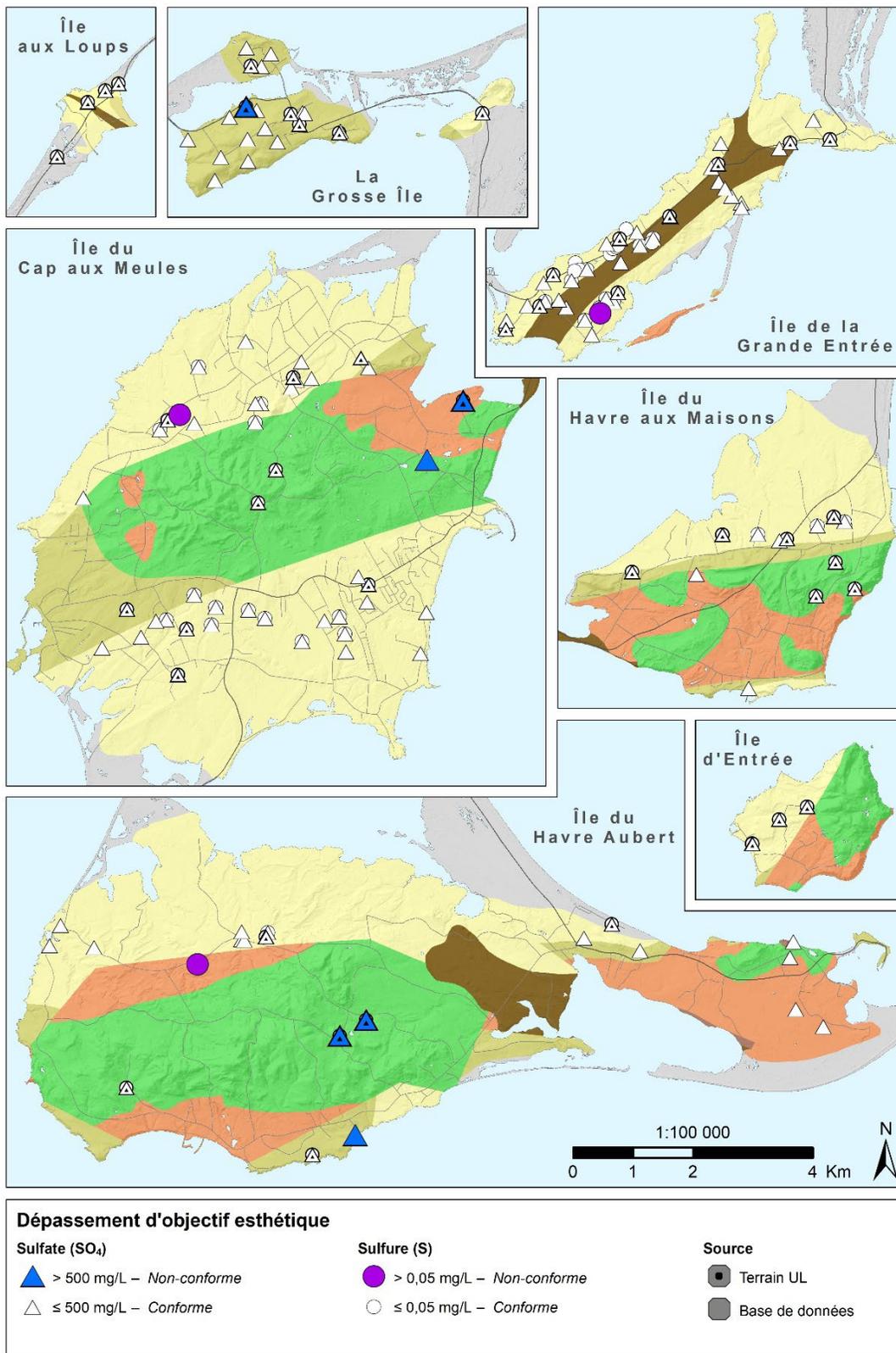


Figure 8.34 : Dépassements des objectifs esthétiques pour le sulfate (SO<sub>4</sub>) et les sulfures totaux (S) (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8)

L'objectif esthétique des matières dissoutes totales (MDT) est fondé sur le goût et le risque d'entartrage des conduites d'eau et appareils ménagers (Santé Canada, 2019a). Leur origine peut être naturelle, ou provenir d'eau usée, du ruissellement d'origine urbaine et agricole et des eaux industrielles (Santé Canada, 2019a). Les MDT sont composés entre autres de chlorure et sodium. Parmi les 11 puits des données BD présentant des dépassements en MDT (Tableau 8.19), quatre ont aussi des dépassements en chlorure (Cl) et un en sodium (Na). Les proportions sont moindres pour les données terrain UL où, pour les 12 puits ayant des dépassements en MDT, quatre présentent des dépassements en sulfates, deux en chlorure et un en sodium. Aux îles de la Madeleine, on retrouve des dépassements dans toutes les unités géologiques et sur toutes les îles, à l'exception des îles du Havre aux Maisons et aux Loups (Figure 8.35). Un des dépassements n'est pas visible, car localisé sur un cordon dunaire.

Les dépassements en pH sont assez nombreux pour les échantillons des données terrain UL (29 %) et des données BD (13 %) (Tableau 8.19), et sont répartis un peu partout sur les îles (Figure 8.35). Le contrôle du pH permet de diminuer la corrosion et le relargage du réseau de distribution d'eau et des éléments de plomberie, en plus de maximiser l'effet d'un traitement de l'eau si présent (Santé Canada, 2019a). Un des dépassements est localisé sur un cordon dunaire et n'est pas visible à la Figure 8.35.

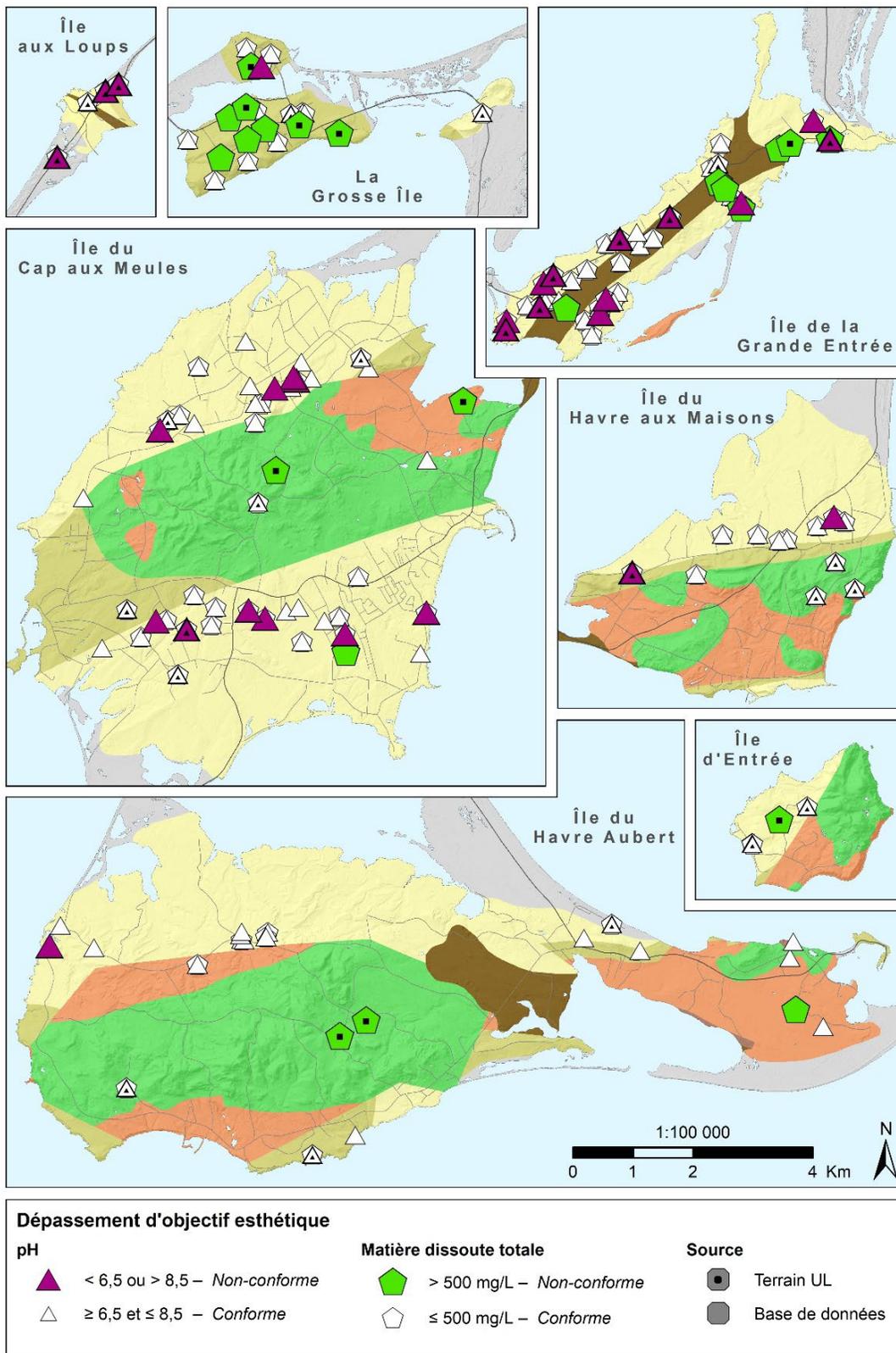


Figure 8.35 : Dépassements des objectifs esthétiques pour le pH et la matière dissoute totale (pour la légende de la géologie en fond de carte, voir la Figure 5.8)

## 8.6 Vulnérabilité de l'eau souterraine

La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines des îles de la Madeleine a été évaluée à l'aide de la méthode DRASTIC (Aller et coll., 1987). Cette méthode est prescrite par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) pour les aires de protection des sources d'eau potable. Elle permet l'obtention d'un indice variant de 23 à 226. Plus l'indice est élevé, plus la sensibilité de l'eau souterraine à se voir affecter par une contamination provenant directement de la surface est forte. Sept paramètres hydrogéologiques et géologiques, au degré d'influence variable dans le calcul de l'indice, doivent être considérés :

- D – Profondeur à la nappe;
- R – Recharge;
- A – Nature de l'aquifère;
- S – Type de sol;
- T – Pente du sol;
- I – Nature de la zone vadose;
- C – Conductivité hydraulique de l'aquifère.

La Carte 38 : Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC, en annexe électronique, ainsi que la Figure 8.36, présentent les indices DRASTIC calculés sur l'ensemble de l'archipel sur des mailles de 20 m par 20 m. La méthode de calcul et les résultats pour chacun des sept paramètres de la méthode DRASTIC sont décrits et illustrés à l'Annexe 15.

Les indices DRASTIC obtenus varient de 87 à 184, avec une moyenne de 142 (Tableau 8.20). Des indices de plus de 140 sont obtenus pour plus de la moitié du territoire (Tableau 8.21). Environ 7 % du territoire présente des indices de 100 ou moins et 6 % du territoire des indices de 180 et plus. Globalement, les aquifères des îles de la Madeleine sont vulnérables à la contamination de surface.

Les indices les plus élevés, avec une moyenne de 177 (Tableau 8.20), correspondent aux dunes de sable reliant les îles entre elles, là où la surface libre de la nappe est près de la surface, l'aquifère et la zone vadose sont très perméables, les sols sont sableux et le terrain est peu accidenté. Les eaux souterraines dans les dunes sont donc les plus vulnérables à la contamination. Inversement, les aquifères des buttes centrales sont les moins vulnérables, avec une moyenne de leurs indices DRASTIC de 121 (Tableau 8.20). La profondeur à la nappe élevée est probablement le paramètre qui participe le plus à faire diminuer la vulnérabilité. Le roc moins perméable constituant la zone vadose et le milieu aquifère, jumelé à des sols loameux à argileux et à un terrain pentu contribuent aussi à cet effet. Sur les plateaux de grès, la vulnérabilité est assez variable, mais demeure en moyenne relativement élevée avec un indice moyen de 147 (Tableau 8.20). On y observe un gradient du moins au plus vulnérable vers les côtes, principalement en fonction de la profondeur à la nappe qui décroît dans la même direction. La grande influence de ce paramètre s'observe aussi le long des cours d'eau, où la surface libre de la nappe est plus près de la surface, conférant ainsi une vulnérabilité plus élevée, indépendamment du contexte géomorphologique.

**Tableau 8.20 : Statistiques des indices DRASTIC selon les contextes géomorphologiques**

Contexte géomorphologique	Indice DRASTIC		
	Min	Max	Moyenne
Buttes centrales	87	157	121
Plateaux de grès	95	176	147
Dunes de sable	131	184	177
<b>Îles de la Madeleine</b>	<b>87</b>	<b>184</b>	<b>142</b>

**Tableau 8.21 : Distribution des indices DRASTIC pour l'ensemble des îles de la Madeleine**

Quantile (%)	Indice DRASTIC (m)
0	87
25	124
50	143
75	161
100	184

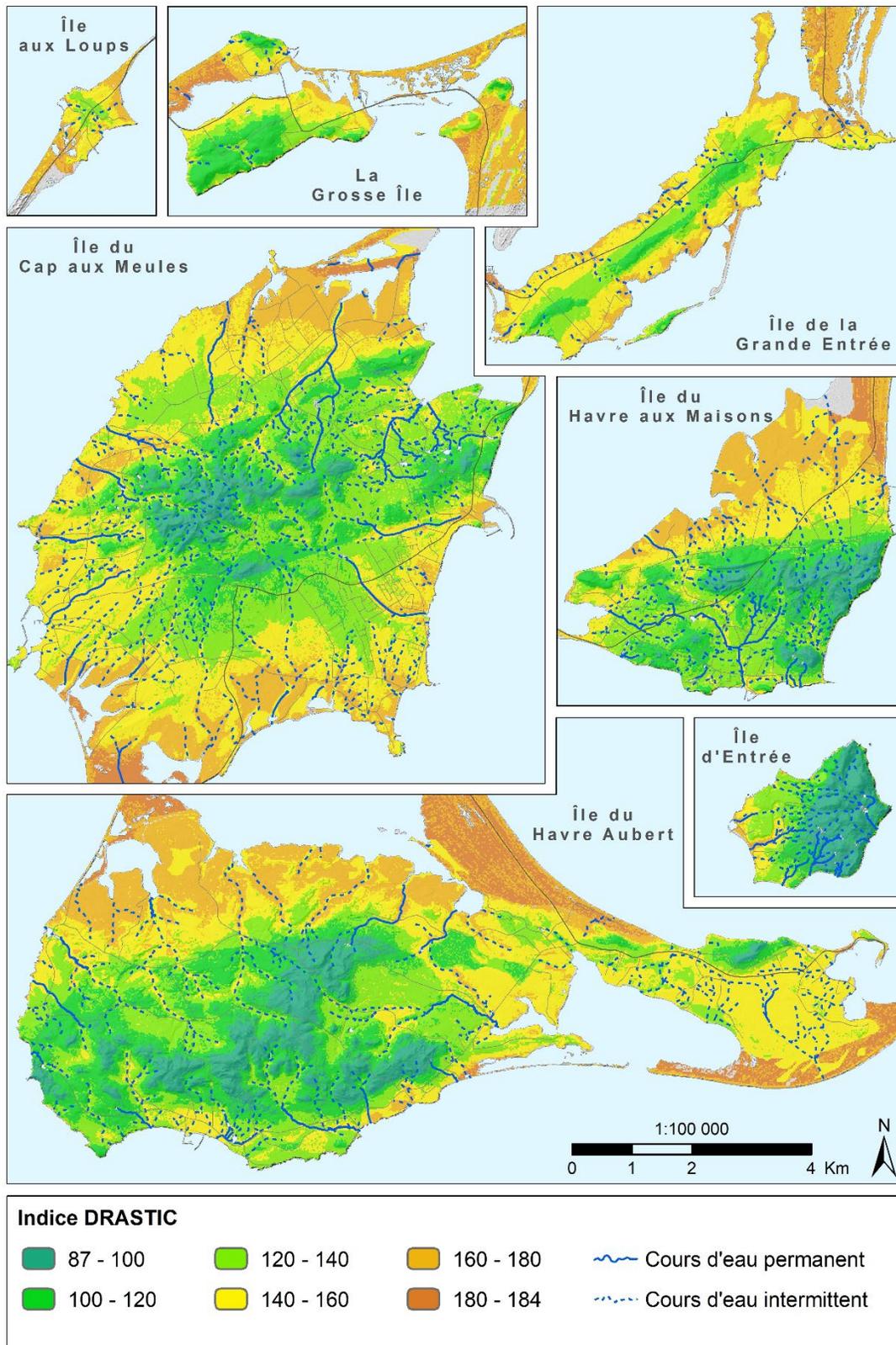


Figure 8.36 : Vulnérabilité des aquifères selon la méthode DRASTIC

## 8.7 Coupes hydrogéologiques

La Figure 8.37 présente des coupes dans lesquelles le contexte hydrogéologique propre à chacune des îles principales est illustré. Les formations aquifères, calquées sur les unités géologiques, y sont représentées de manière simplifiée, selon leur potentiel d'exploitation (faible, moyen, élevé et très élevé), tel qu'établi à la Section 8.2.5. L'élévation de la surface libre de la nappe (Section 8.3.1.1) et l'épaisseur de la lentille d'eau douce (Section 8.3.3), déduite de la profondeur de l'interface (Section 8.3.2), proviennent des résultats de simulation numérique et sont représentées de manière réaliste. Par contre, les lignes d'écoulement de l'eau souterraine sont des ajouts manuels afin d'illustrer schématiquement les directions d'écoulement de l'eau souterraine. L'exagération verticale diffère selon les coupes, et varie de 2x à 5x. Les traces des coupes sont montrées à la Figure 8.38, accompagnées de la position des aquifères en surface, distingués selon leur potentiel d'exploitation. Les coupes sont aussi illustrées sur la Carte 20 : Limites des aquifères, potentiel d'exploitation et coupes hydrogéologiques, en annexe électronique.

Pour les îles dont le noyau est un horst formé d'aquifères au potentiel d'exploitation faible (Cap aux Meules, Havre Aubert, Havre aux Maisons et d'Entrée), l'élévation de la surface libre de la nappe phréatique est, au centre de ces îles, élevée en raison de la faible conductivité hydraulique des roches qui les composent. Sur les horsts, le relief est accidenté et la nappe phréatique affleure dans les petites vallées où les résurgences alimentent de petits cours d'eau. D'ailleurs, pour ces îles, les résurgences terrestres occupent une grande proportion du bilan hydrologique détaillé. En raison de l'élévation importante de la surface libre, la lentille d'eau douce y est également épaisse, avec une profondeur de l'interface eau douce – eau salée supérieure à 500 m. Dans les aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé, l'élévation de la surface libre y est plus près du niveau moyen de la mer. Il en résulte une lentille d'eau douce d'épaisseur nettement plus faible qu'au centre des îles. Sur l'île du Cap aux Meules, l'épaisseur de la lentille d'eau douce contenue dans les aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé atteint des valeurs maximales d'environ 200 m sur les flancs nord et sud, à l'exception d'une bande de quelques centaines de mètres de largeur, située au nord du horst de l'île, où elle dépasse 500 m d'épaisseur. Cette bande correspond à la présence d'une unité géologique différente dans ce secteur, soit le Membre de l'Étang-du-Nord, tel qu'illustré à la Figure A.85 de l'Annexe 11, moins perméable que les roches du Membre de l'Étang-des-Caps retrouvées sur le reste de l'île et formant les aquifères à potentiel d'exploitation élevé à très élevé. Le même phénomène se produit sur le flanc nord de l'île du Havre aux Maisons. Pour les îles du Havre Aubert et du Havre aux Maisons, il est à noter que la lentille d'eau douce située sur le flanc sud est très étroite par rapport à celle du flanc nord, puisqu'on y retrouve une bande beaucoup plus mince du plateau de grès composé des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord. Enfin, pour l'île d'Entrée, seul le flanc nord de l'île comprend une lentille d'eau douce située dans les aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé.

Pour la Grosse Île, deux lentilles d'eau douce d'épaisseur supérieure à 300 m sont contenues dans les aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé. Sur l'île aux Loups, l'épaisseur de la lentille d'eau douce contenue dans les aquifères au potentiel d'exploitation élevé à très élevé au droit de la coupe ne dépasse pas 65 m.

Enfin, pour l'île de la Grande Entrée, le contenu de la coupe diffère légèrement des autres. En effet, les dépôts chenalisés de sable y sont représentés, atteignant une épaisseur supérieure à 80 m. Les puits

d'observation du RSESQ y sont également représentés, incluant les sections tubées et crépinées. Sur cette île, l'élévation de la nappe phréatique ne dépasse pas 2 m, c'est pourquoi la forme de la surface libre semble horizontale. Il en résulte que les gradients hydrauliques sont très faibles. Enfin, l'épaisseur de la lentille d'eau douce, au droit de cette coupe, est d'environ 40 m.

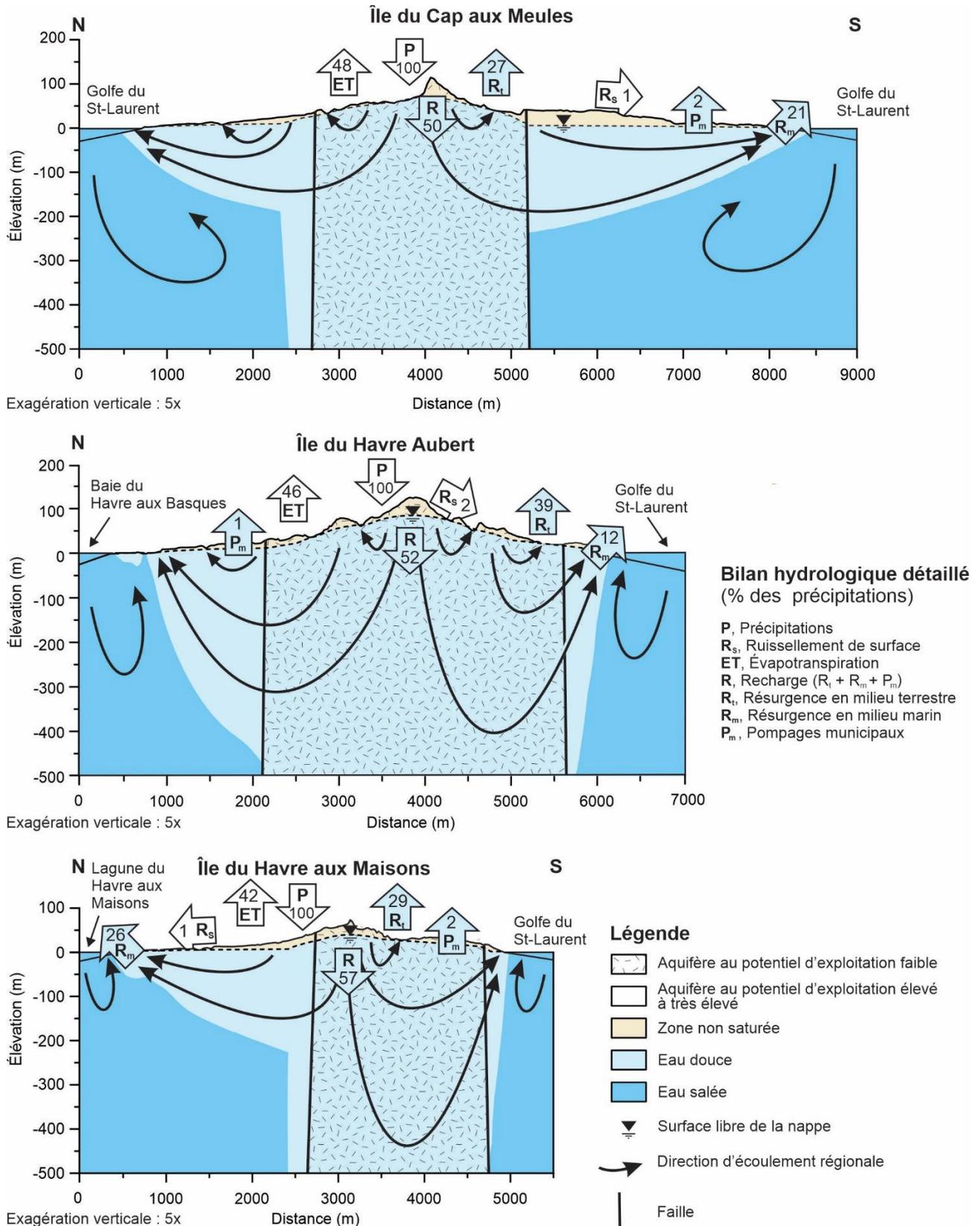
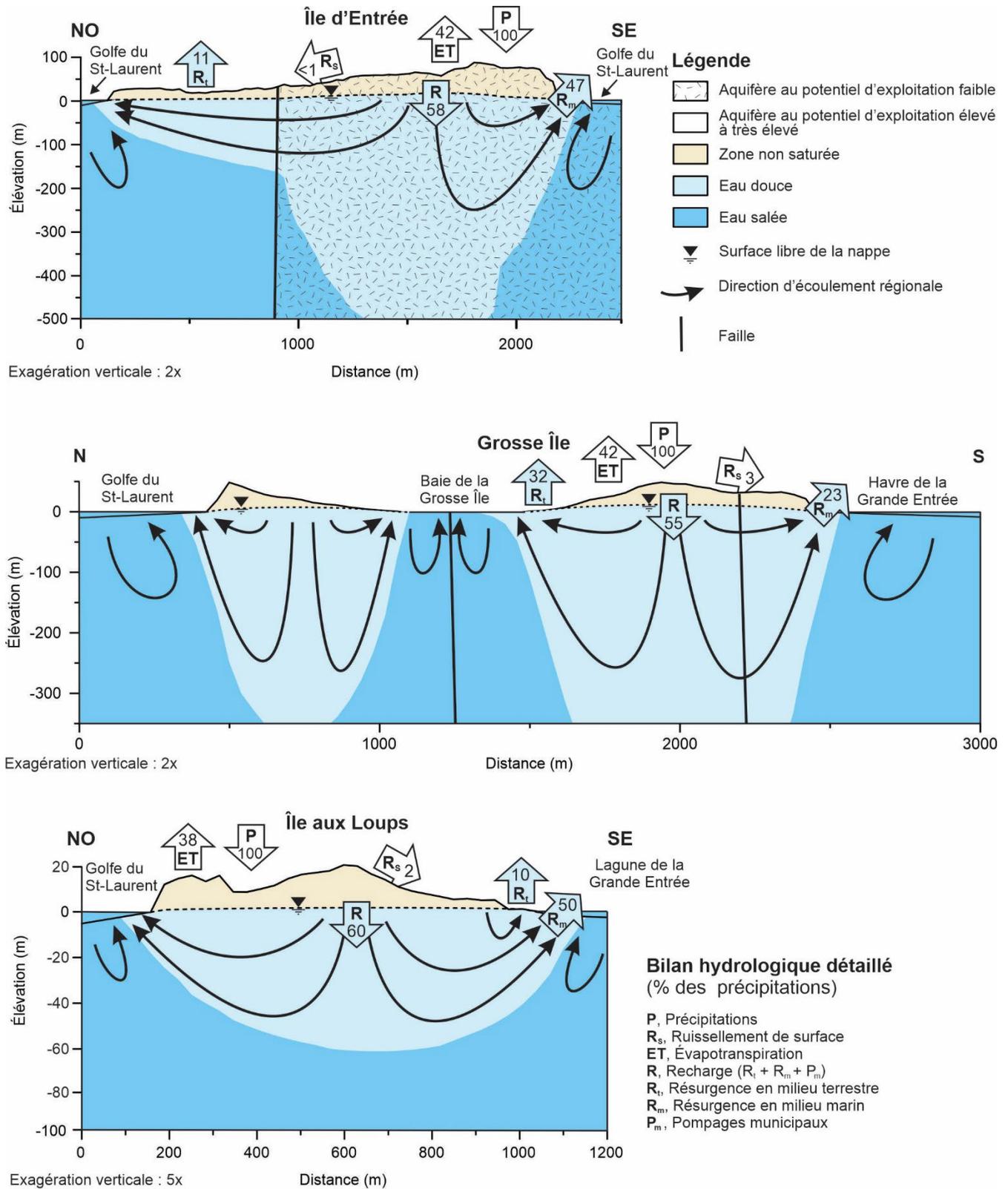


Figure 8.37 : Coupes hydrogéologiques



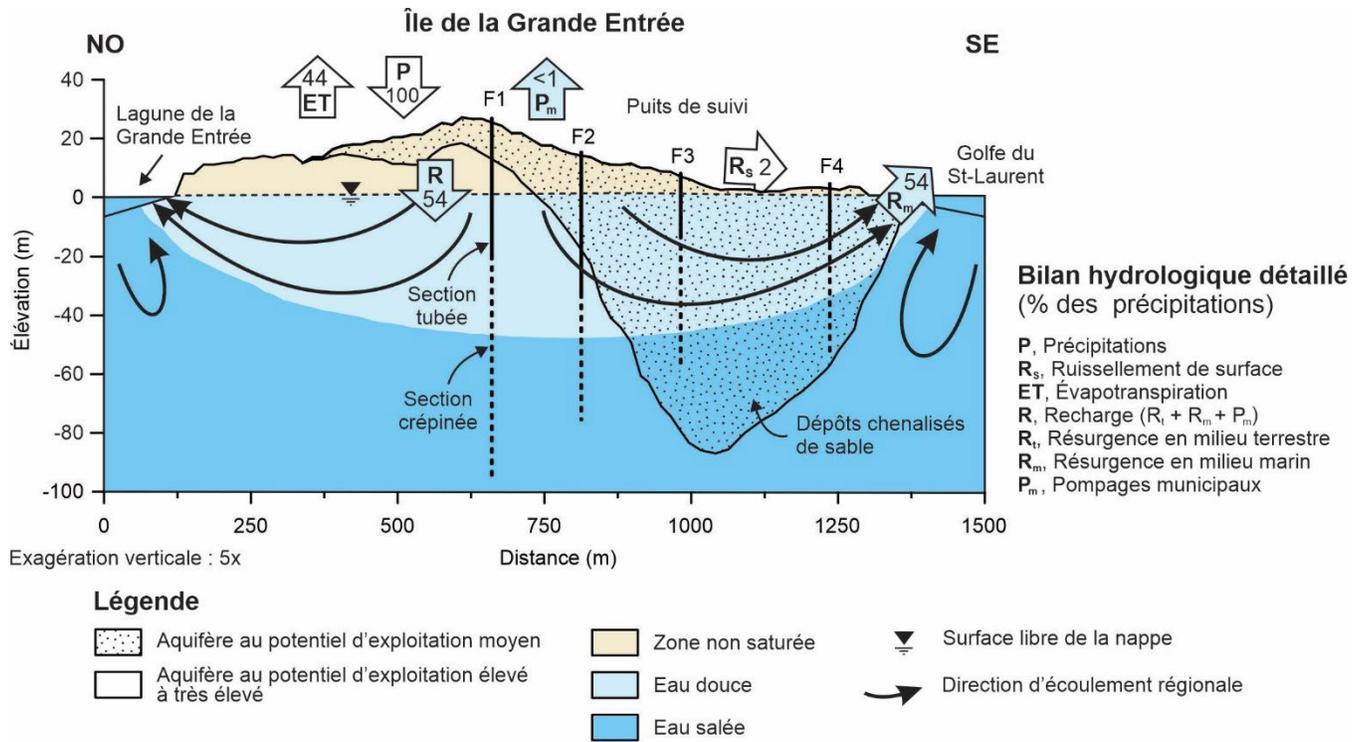


Figure 8.37 : Coupes hydrogéologiques (suite)



Figure 8.38 : Traces des coupes hydrogéologiques

## 9 GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

### 9.1 Outils quantitatifs pour la gestion de la ressource

Il a déjà été mentionné que les ressources en eau souterraine sont d'une importance vitale aux îles de la Madeleine. Leur gestion doit donc s'effectuer de manière durable afin d'en assurer la pérennité. Le portrait dressé dans les sections précédentes vient établir les connaissances sur les conditions actuelles de la ressource. Le développement d'outils quantitatifs, en considérant les conditions attendues dans le futur, est d'intérêt pour l'adoption et la mise en place de mesures de gestion et de protection de la ressource, adaptées au contexte insulaire des îles de la Madeleine. La surexploitation et la pérennité des puits municipaux constituent deux des préoccupations prioritaires identifiées par les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine (Section 6). Dans le cadre de cette étude, une estimation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée a été réalisée sous les puits municipaux (Section 9.1.1). Cette évaluation vise à savoir si la position de l'interface a atteint un état d'équilibre depuis leur mise en service, afin d'évaluer si les observations actuelles sur la position de l'interface seront valides dans le futur. Ceci permet de juger de la pérennité des réseaux de puits en place en fonction de leurs débits d'exploitation actuels. Dans un second temps, les ressources exploitables avec les réseaux de puits en place ont été quantifiées, en considérant la demande future en eau ainsi que l'effet des changements climatiques (Section 9.1.2). Cette analyse, en plus d'évaluer la capacité de pompage additionnelle des installations actuelles, permet d'évaluer si le système peut supporter les débits d'exploitation actuels, sans risque d'intrusion d'eau salée. En d'autres termes, cela permet de juger si l'exploitation actuelle est durable. Enfin, une cartographie des aires d'alimentation des aquifères exploitables a été réalisée (Section 9.1.3). Celle-ci correspond aux parties du territoire d'où s'infiltre l'eau des précipitations pour recharger les nappes actuellement exploitées ou qui pourront servir pour les générations futures. L'évaluation des impacts des activités humaines, qui constitue la troisième préoccupation prioritaire par les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine (Section 6), pourrait être effectuée dans ces secteurs qui sont de surcroît vulnérables à la contamination.

#### 9.1.1 *Évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux*

Le pompage d'un puits cause un rabattement de la nappe, ce qui induit une remontée de l'interface eau douce – eau salée sous le puits. Plus un débit d'exploitation est élevé, plus le rabattement est important, exacerbant ainsi le phénomène de la remontée de l'interface et le risque de contamination du puits par de l'eau salée. La connaissance sur la position attendue de l'interface eau douce – eau salée sous un puits prélevant des volumes d'eau importants, comme c'est le cas pour les puits alimentant les réseaux de distribution en eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, est de grand intérêt. Comme la remontée de l'interface est graduelle suite à la mise en service d'un puits, il semble important de déterminer si la remontée de l'interface a atteint son état d'équilibre, ou sinon d'estimer la proportion de la remontée actuelle par rapport à l'atteinte de son niveau d'équilibre.

À partir des modèles d'écoulement souterrains basés sur le programme MODFLOW-2005 et du module SWI2 (Section 7.5), il est possible de mener des simulations en régime transitoire pour suivre l'évolution de variables (par exemple la piézométrie ou la profondeur de l'interface) après une perturbation du

système (par exemple la mise en fonction d'un puits municipal). Les simulations en régime transitoire nécessitent quelques paramètres supplémentaires par rapport au régime permanent : la porosité de drainage, l'emmagasinement spécifique et la porosité cinématique. En condition de nappe à surface libre, l'évolution du niveau de la nappe dans le temps dépend de la porosité de drainage, tandis qu'en condition de nappe confinée, par exemple sous les cours d'eau, elle dépend de l'emmagasinement spécifique. L'évolution du niveau de l'interface eau douce – eau salée au cours du temps dépend de son côté de la porosité cinématique.

Les valeurs de porosité de drainage sont disponibles au Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2). Les valeurs répertoriées dans ce tableau proviennent de la littérature, excepté pour les roches du Membre de l'Étang-des-Caps pour lesquels des mesures ont été utilisées. Celles-ci ne proviennent cependant que d'une seule zone, et il est possible que la porosité de drainage ne soit pas homogène au sein d'une unité géologique. Pour tenir compte de cette incertitude, des simulations ont été réalisées avec des bornes de porosité de drainage minimales et maximales pour chaque unité géologique. Il s'agit d'évaluer succinctement l'influence sur les résultats de ce paramètre auquel est associée une grande incertitude, et qui n'a pas bénéficié de processus de calibration. Les bornes maximales correspondent aux porosités totales et les bornes minimales sont celles issues de la littérature si disponible (Tableau 8.3). La porosité de drainage minimale du Membre de l'Étang-des-Caps est appliquée au Membre de l'Étang-du-Nord. Les porosités de drainage minimales des Formations du Cap au Diable et du Havre aux Maisons sont fixées à 1 % (porosité totale minimale estimée pour la Formation du Cap au Diable) et celle des dykes et stocks de gabbro à 0,05 %.

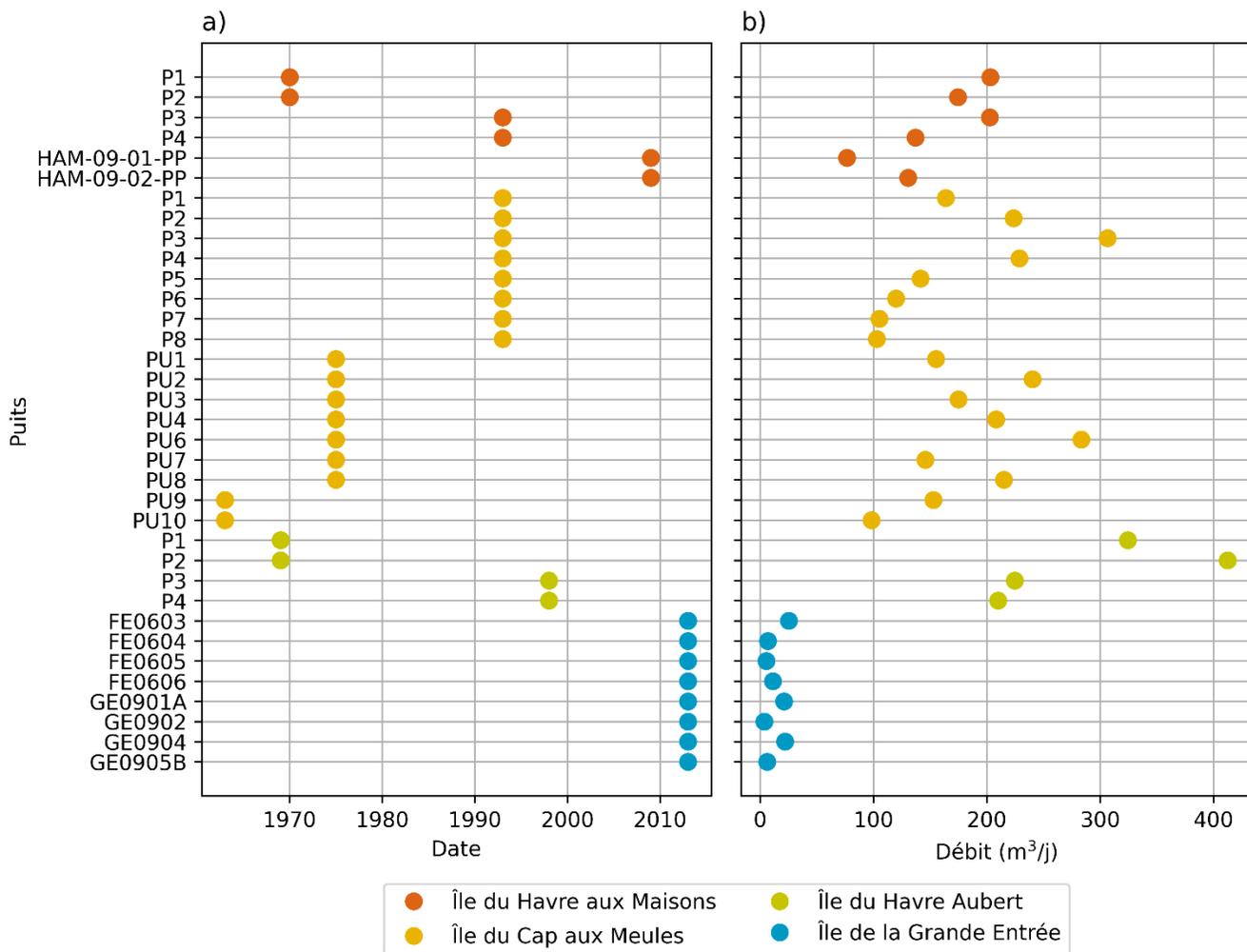
Les valeurs d'emmagasinement spécifique choisies pour les unités géologiques du Membre de l'Étang-des-Caps, du Membre de l'Étang-du-Nord et de la Formation du Cap au Diable correspondent aux moyennes du Tableau 8.2 (Section 8.1.1). En l'absence de donnée disponible, l'emmagasinement spécifique de la Formation du Cap au Diable est appliqué à la Formation du Havre aux Maisons, et celle du Membre de l'Étang-des-Caps aux dépôts meubles chenalisés. L'impact de ces approximations est faible, car la nappe est libre sur une grande majorité du territoire, et donc l'emmagasinement spécifique n'a qu'une influence locale sur sa dynamique.

Pour les grès du Membre de l'Étang-des-Caps, puisque constitué de sable fin relativement uniforme, on considère que la porosité cinématique et la porosité de drainage sont très proches. En l'absence de données supplémentaires, cette approximation est appliquée à toutes les unités géologiques et les valeurs de porosité de drainage sont utilisées comme porosité cinématique dans le module SWI2.

La situation utilisée comme état initial des simulations en régime transitoire est issue d'une simulation sans pompage en régime permanent. À partir de cet état initial à l'équilibre, la simulation en régime transitoire débute pour chaque modèle à la date de la mise en pompage du premier puits ou groupe de puits de l'île concernée. Au cours de la simulation, chaque puits est mis en pompage à la date lui correspondant, et la remontée de l'interface est suivie dans le temps pendant cinq siècles pour s'assurer de simuler une remontée complète. Comme les années exactes de mise en fonction des puits ne sont souvent pas connues, les dates de forages des puits, identifiés au Tableau 3.2 (Section 3.1.1) ont été utilisées, exception faite de l'île de la Grande Entrée pour laquelle la date de mise en service des puits est connue (Figure 9.1). Comme la simulation doit représenter au mieux les volumes d'eau exploités depuis la mise en service des puits, les débits de pompages utilisés correspondent à la moyenne des

débites d'exploitation sur la plus longue période possible de disponibilités des données, c'est-à-dire de 2002 à 2020 pour toutes les îles à l'exception de Grande Entrée pour laquelle la période est de 2014-2020 (Section 3.1.3). On considère donc qu'à partir de la mise en fonction de chaque puits et jusqu'à la fin de la simulation, le débit de pompage est constant et égal à cette moyenne. Cette simplification, en plus d'économiser du temps de calcul, a pour intérêt de faciliter l'interprétation des résultats, notamment en ce qui concerne l'influence des puits les uns sur les autres.

À noter que le puits HQ-2 de l'île d'entrée, étant donné son faible débit d'exploitation, n'a pas été inclus dans ces évaluations.



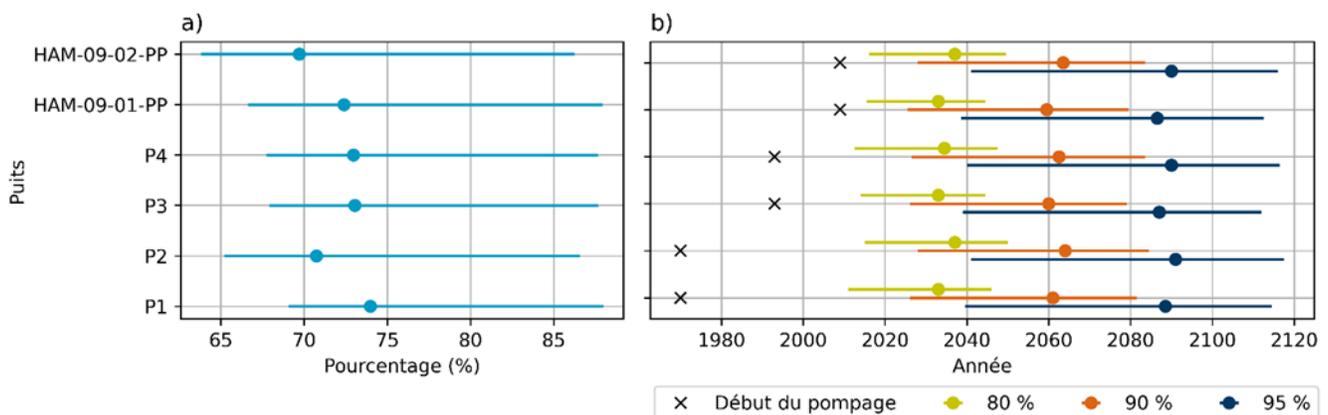
**Figure 9.1 : Données d'entrées intégrées dans les simulations en régime transitoire pour chaque puits. a) Date de mise en fonction du puits. b) Débit moyen d'exploitation sur la période 2002-2020**

Pour chaque puits municipal, l'état de la remontée en 2022 a été estimé, ainsi que la période à laquelle la remontée sera complète à 80, 90 et 95 % (Figure 9.2, Figure 9.4, Figure 9.5 et Figure 9.6). La dynamique de la remontée de l'interface sous les puits s'apparente à une fonction asymptotique, c'est-à-dire que dans les premières années, la remontée est rapide, et ralentie ensuite au fil du temps en s'approchant du niveau d'équilibre. Pour certains puits, le niveau initial de l'interface était inconnu, car il

était plus profond que la base du modèle (300, 350 ou 500 m sous le niveau de la mer, dépendamment des îles – Section 7.5.1) et il n'a donc pas été possible d'évaluer l'état de la remontée en termes de pourcentage. Pour ces puits, les courbes de remontée de l'interface sont présentées (Figure 9.3).

Le temps de remontée de l'interface est fortement influencé par la porosité de drainage. Plus celle-ci est importante, plus les écoulements d'eau sont lents et plus l'interface eau douce – eau salée remonte lentement. Il est ardu d'expliquer les différences de temps de mise à l'équilibre entre les îles ou les secteurs en détail. Les facteurs potentiellement influents sont multiples, par exemple l'élévation initiale de l'interface, le débit de pompage ou la proximité avec des unités géologiques peu perméables.

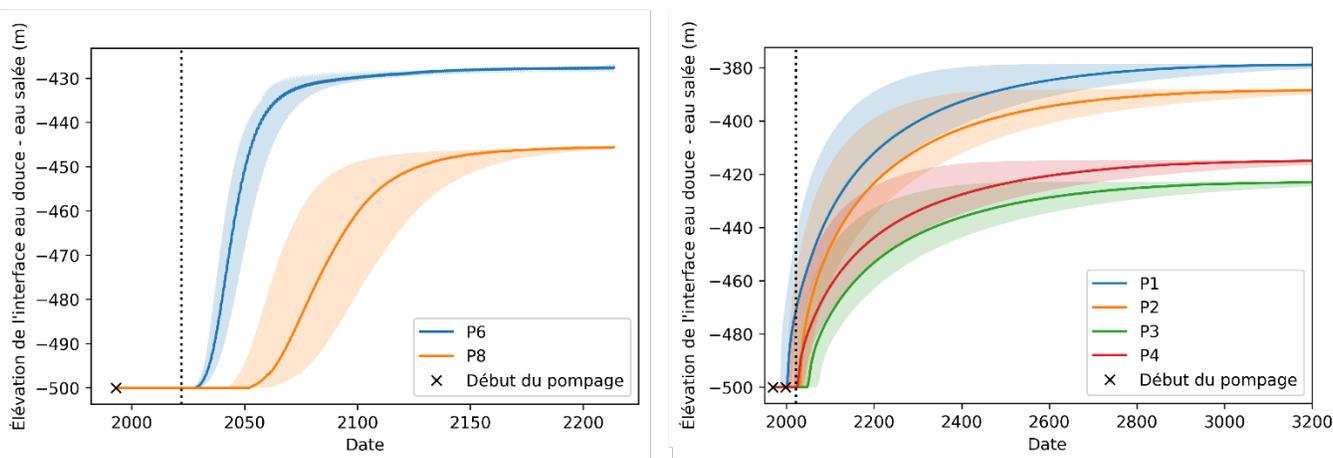
Sur l'île du Havre aux Maisons, en 2022, on estime que la remontée de l'interface est complétée à hauteur de 70 à 75 % pour l'ensemble des puits (Figure 9.2). Celle-ci devrait atteindre 95 % entre 2080 et 2100. Même si les puits ont été mis en fonction par groupe de deux, à plusieurs décennies d'écart (Figure 9.1), la progression de la remontée de l'interface eau douce – eau salée semble synchrone. Les puits sont assez proches les uns des autres pour s'influencer. Ainsi, la mise en fonction d'un puits peut causer un léger rabattement aux puits voisins, et retarder la mise à l'équilibre de l'interface à l'aplomb de ceux-ci. Par exemple, lorsque le pompage du puits P3 débute en 1993, on observe un rabattement supplémentaire au puits voisin P2 déjà en fonction. Le processus de mise à l'équilibre de l'interface en est donc repoussé d'autant.



**Figure 9.2 : Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux de l'île du Havre aux Maisons. Les points représentent les simulations effectuées avec la porosité de drainage de chaque unité géologique du Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2) et les barres d'erreurs représentent les simulations effectuées avec les bornes maximales et minimales des porosités de drainage. a) Pourcentage de la remontée en 2022. b) Temps pour que la remontée soit complétée à 80, 90 et 95 %**

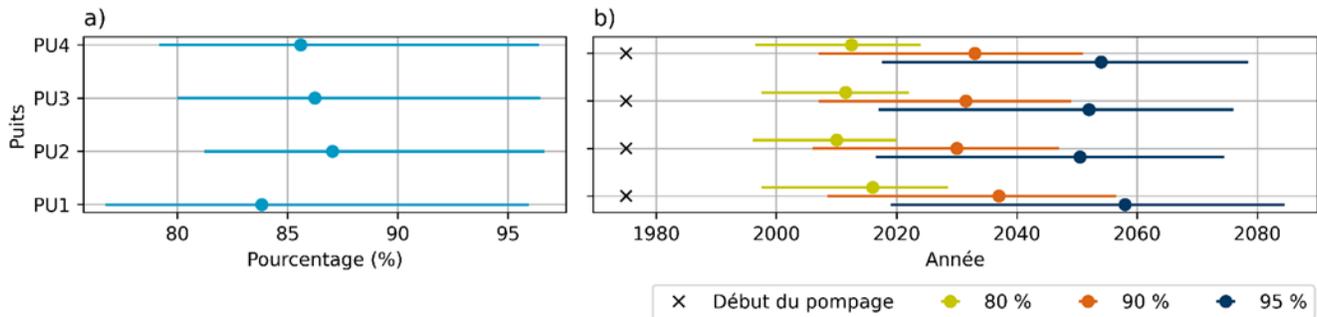
Sur l'île du Cap aux Meules, les puits P7 et P8 (secteur Fatima) ainsi que P6 et PU5 (secteur Étang-du-Nord) se trouvent dans les roches du Membre de l'Étang-du-Nord (voir la géologie utilisée dans la modélisation à la Figure A.85 de l'Annexe 11). À noter dans ce secteur, le puits PU5 actuellement arrêté a été considéré comme sans pompage durant la totalité de la simulation. Avant pompage, sous les puits P7, P8 et P6, l'interface eau douce – eau salée est située à au moins 500 m sous le niveau de la mer. Après sa mise en fonction, l'interface sous le puits P7 remonte, mais reste plus profonde que 500 m sous le niveau de la mer, et ce durant toute la durée de la simulation sur les cinq siècles. Le modèle ne permet donc pas d'évaluer la dynamique de la remontée sous ce puits. En revanche, sous les puits P8 et P6,

plus proches de la limite géologique avec les roches du Membre de l'Étang-des-Caps, l'interface remonte progressivement et dépasse le seuil de 500 m sous le niveau de la mer après quelques années (Figure 9.3). L'interface atteint plus rapidement l'équilibre sous le puits P6 que sous le puits P8, avec une stabilisation de la remontée autour de 2075 pour P6 et 2150 pour P8. Ces deux puits ont été forés la même année en 1993, et le débit de pompage moyen utilisé dans la modélisation est proche (120 m<sup>3</sup>/j pour P6 et 103 m<sup>3</sup>/j pour P8). Par contre, le puits P6 est deux fois plus près de la limite géologique avec les roches du Membre de l'Étang-des-Caps que P8 (70 m contre 140 m).

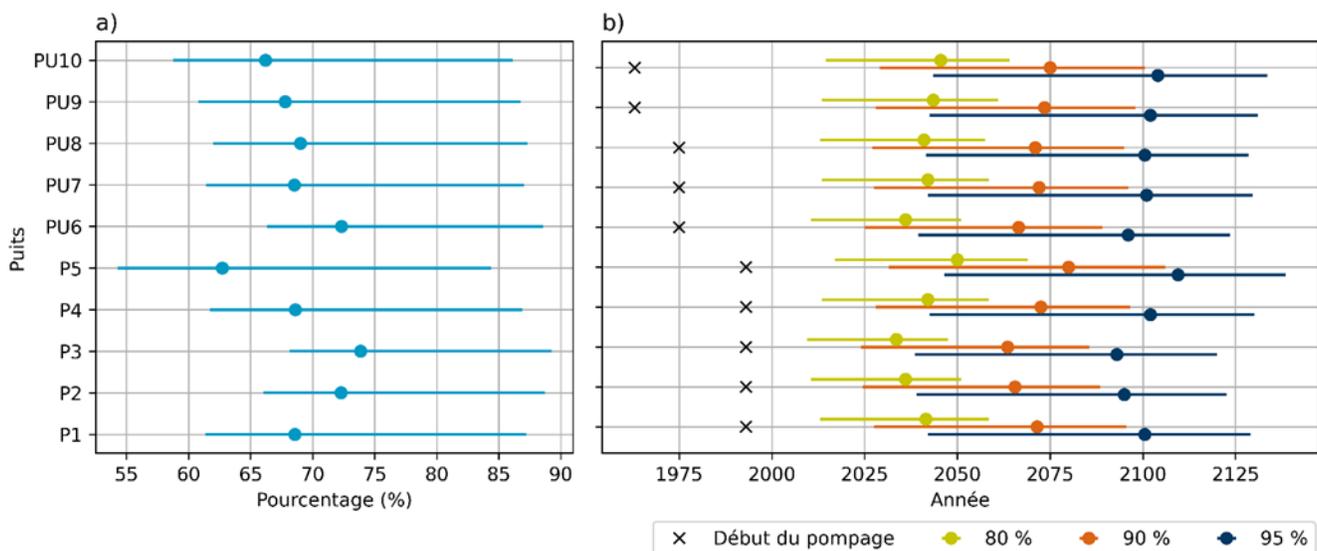


**Figure 9.3 : Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits de pompage municipaux P6 et P8 de l'île du Cap aux Meules (à gauche) et P1, P2, P3, P4 de l'île du Havre Aubert (à droite). Les courbes représentent les simulations effectuées avec la porosité de drainage de chaque unité géologique du Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2) et les enveloppes représentent les simulations effectuées avec les bornes maximales et minimales des porosités de drainage**

Les quatre puits du secteur Fatima situés dans les roches du Membre de l'Étang-des-Caps (PU1, PU2, PU3 et PU4) montrent en 2022 des remontées de l'interface complétées autour de 80 %, et celles-ci devraient atteindre 95 % entre 2050 et 2060 (Figure 9.4). Dans le secteur du secteur de l'Étang-du-Nord, puisque les 10 puits localisés dans les roches du Membre de l'Étang-des-Caps sont assez proches les uns des autres, et que les mises en fonction des puits se sont faites en plusieurs étapes (Figure 9.1), la mise à l'équilibre de l'interface est plus lente. La remontée est complétée à hauteur de 60 à 75 % en 2022 (Figure 9.5). Les puits se synchronisent sur une même dynamique dans la partie finale de la remontée de l'interface eau douce – eau salée et la mise à l'équilibre devrait être complétée à 95 % autour de 2100.



**Figure 9.4 : Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux de l'île du Cap aux Meules, secteur Fatima. Les points représentent les simulations effectuées avec la porosité de drainage de chaque unité géologique du Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2) et les barres d'erreurs représentent les simulations effectuées avec les bornes maximales et minimales des porosités de drainage. a) Pourcentage de la remontée en 2022. b) Temps pour que la remontée soit complétée à 80, 90 et 95 %**

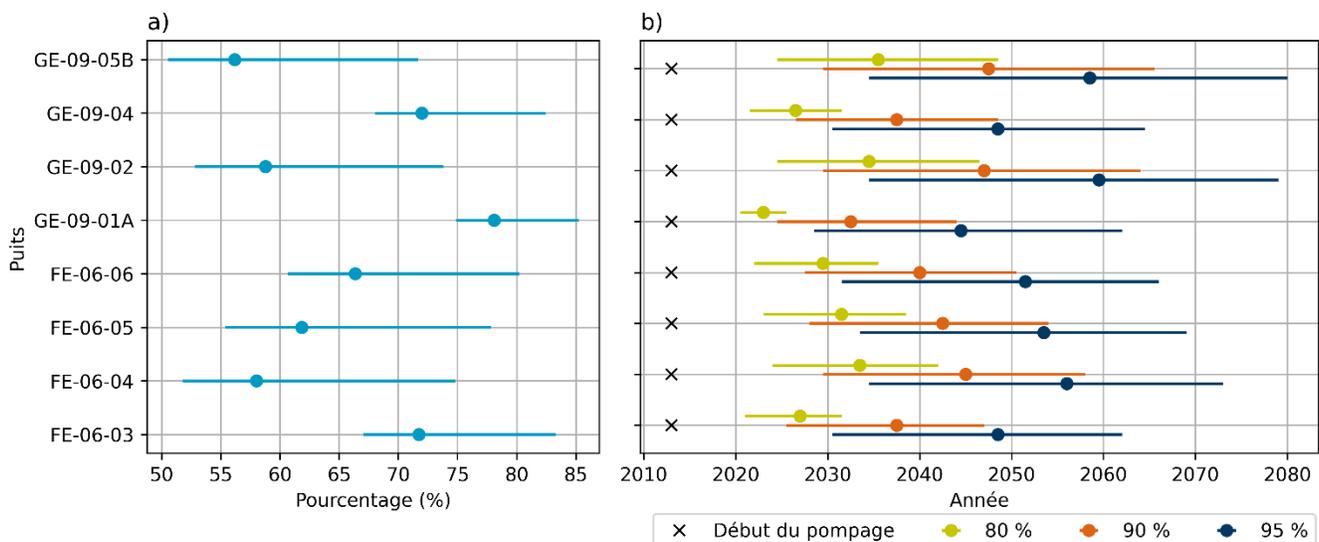


**Figure 9.5 : Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux de l'île du Cap aux Meules, secteur de l'Étang-du-Nord. Les points représentent les simulations effectuées avec la porosité de drainage de chaque unité géologique du Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2) et les barres d'erreurs représentent les simulations effectuées avec les bornes maximales et minimales des porosités de drainage. a) Pourcentage de la remontée en 2022. b) Temps pour que la remontée soit complétée à 80, 90 et 95 %**

Sur l'île du Havre Aubert, comme les essais de pompage ont été réalisés en même temps, et comme ces puits sont situés à moins de 75 m l'un de l'autre, il est très probable que le cône de rabattement soit commun aux deux puits et soit ainsi accentué. Les puits P1 et P2 ont été forés en 1969, et les puits P3 et P4 en 1998. Tous les puits sont très proches les uns des autres. L'interface eau douce – eau salée sous ces puits, à l'état sans pompage, est plus profonde que 500 m sous le niveau de la mer. L'interface sous les puits aval (P1 et P4) remonte au-dessus de ce seuil avant leurs voisins amont respectifs (P2 et P3) (Figure 9.3). La mise à l'équilibre sous tous ces puits suit un rythme de plus en plus lent à mesure que le temps passe. Le rythme très lent pourrait s'expliquer par la proximité des puits avec des unités géologiques peu perméables. À l'échelle du territoire, hormis le puits P7 du secteur de Fatima sur l'île

du Cap aux Meules, ce sont les puits municipaux localisés le plus près des roches des formations du Havre aux Maisons ou du Cap au Diable (entre 200 et 300 m seulement).

Sur l'île de la Grande Entrée, le puits GE-09-03 actuellement arrêté a été considéré comme sans pompage durant la totalité de la simulation. En 2022, on estime que l'interface eau douce – eau salée sous les puits a parcouru entre 55 et 80 % de sa remontée (Figure 9.6). La remontée de l'interface sera complète à 95 % entre 2045 et 2060. À noter que les puits ont été mis en service récemment, en 2013. Il est à noter également qu'à la mise en service de ces puits en 2013, certains puits n'étaient probablement pas à l'état d'équilibre 'naturel' en raison des très forts pompages historiques aux puits John-Fred et Mario (voir section 6.1). Le mouvement actuel de l'interface pourrait encore être affecté par ces anciens pompages. Enfin, la mise à l'équilibre de l'interface sur l'île de la Grande Entrée est significativement plus rapide que sur les autres îles. Cela pourrait s'expliquer par une interface eau douce – eau salée initiale moins profonde et des débits de pompage moins importants.



**Figure 9.6 : Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux de l'île de la Grande Entrée. Les points représentent les simulations effectuées avec la porosité de drainage de chaque unité géologique du Tableau 8.3 (Section 8.1.2.2) et les barres d'erreurs représentent les simulations effectuées avec les bornes maximales et minimales des porosités de drainage. a) Pourcentage de la remontée en 2022. b) Temps pour que la remontée soit complétée à 80, 90 et 95 %**

### 9.1.2 Quantification des ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place

Une des préoccupations prioritaires en lien avec la gestion des eaux souterraines aux îles de la Madeleine concerne leur exploitation durable. Il a été évalué que la quantité d'eau prélevée annuellement par les captages municipaux correspond à 4,2 % de la recharge totale annuelle des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé (Section 8.4.6), ou 0,075 % du volume d'eau douce souterraine disponible dans ces aquifères. Ces valeurs suggèrent qu'une quantité additionnelle en eau potable pourrait être exploitée durablement. Pour ce faire, de nouveaux puits d'alimentation pourraient être aménagés, ou bien le débit d'exploitation des puits actuels pourrait être augmenté, si les conditions le permettent. Afin d'évaluer cette dernière possibilité, des simulations ont été réalisées dans le but de

déterminer la quantité d'eau maximale qu'il est possible de prélever du réseau de puits actuel tout en prévenant leur contamination par une intrusion d'eau salée. Les simulations ont aussi été produites en considérant l'effet des changements climatiques d'ici 2050, combinant les variations de température, précipitation et de niveau moyen de la mer, qui pourraient avoir pour conséquence de modifier la position de l'interface eau douce – eau salée. Les résultats peuvent ensuite être comparés aux débits d'exploitation actuels (Section 3.1.3) et aux projections de la consommation d'eau en 2050 (Section 0). Cet exercice, en plus d'évaluer la capacité maximale des installations actuelles, permet d'évaluer si les prélèvements sont bien distribués entre les puits de pompage. Ensuite, en comparant ces débits optimisés avec les débits actuels et projetés en 2050, il est possible d'identifier les puits qui disposent d'une marge de manœuvre et ceux qui sont près de leur capacité maximale. Tel que mentionné à la Section 7.5.2.2, cet exercice est réalisé par modélisation numérique avec une procédure d'optimisation qui est décrite en détail à l'Annexe 12.

Rappelons que lorsqu'un puits est en fonction, le rabattement de la nappe occasionne une remontée de l'interface eau douce – eau salée sous le puits (voir Figure 5.24 de la Section 5.2.1). Si cette interface atteint la base du puits, celui-ci captera dès lors de l'eau salée impropre à la consommation. Bien que cette problématique soit réversible en arrêtant tout pompage, le temps de retour à l'équilibre est nettement plus lent que le temps nécessaire à sa remontée. Cette problématique est à éviter pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, car si cela se produit, de nouveaux puits de captages éloignés des puits salinisés devront être construits.

La disponibilité de la ressource en eau souterraine peut aussi être influencée par les changements climatiques. Des variations de températures et de précipitations, des fluctuations du niveau marin et un bouleversement de la dynamique hydrosédimentaire menant à l'érosion des berges sont tous des conséquences des changements climatiques qui sont susceptibles d'entraîner des variations du niveau de la nappe et de l'interface eau douce – eau salée et réduire le volume de l'eau disponible (Section 6.3). Les projections de température et précipitation utilisées pour simuler les débits d'exploitation durable en 2050 avec le réseau de pompage actuel correspondent à la médiane des 72 scénarios climatiques d'Ouranos en 2050 (Section 2.3.7.3). La recharge annuelle de ce scénario médian a été estimée à 554 mm/an, soit une diminution de 2 % de la recharge actuelle de 566 mm/an (Section 8.4.3.2). Cette variation de la recharge a été considérée comme négligeable pour l'optimisation des pompes municipales. La hausse relative du niveau marin a aussi été considérée selon la hausse médiane de 0,19 m attendue en 2050 (Section 2.3.8). Quant à l'érosion côtière, ce phénomène n'a pas été considéré dans les présentes simulations, dû à son impact très limité sur la position de l'interface eau douce – eau salée (Section 6.3).

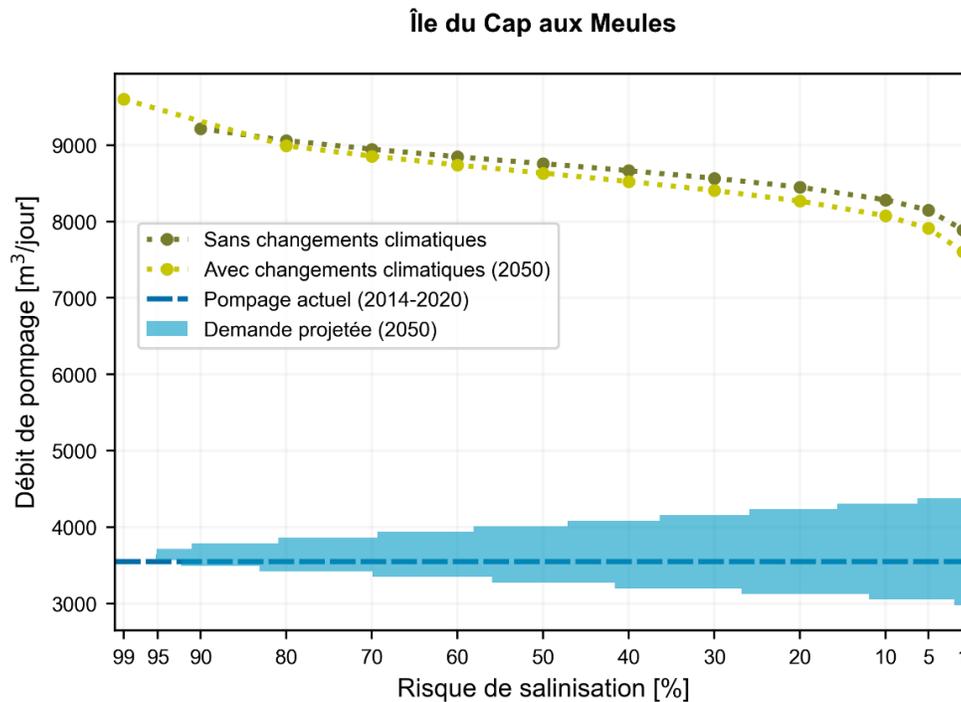
L'approche retenue pour les simulations d'exploitation durable repose sur la formulation d'un problème d'optimisation sous incertitude. Les modèles numériques des écoulements basés sur le programme MODFLOW-2005 et le module SWI2 sont couplés avec un algorithme d'optimisation sous contraintes probabilistes (PESTPP-OPT). L'objectif de l'algorithme est de maximiser les débits de pompage des puits municipaux tout en évitant leur salinisation, en régime permanent. Les incertitudes associées aux paramètres des modèles numériques et aux observations sont propagées à travers le modèle numérique pour obtenir les débits de pompage optimisés pour différents niveaux de risque de salinisation. Ainsi, plusieurs valeurs optimales de débit de pompage sont obtenues, chacune étant associée à un risque de salinisation différent, variant de 1 à 99 %. Les résultats sont ensuite présentés sous la forme d'une courbe

pour laquelle les risques de salinisation sont plus élevés pour des débits élevés, et diminuent lorsque les débits sont plus faibles. Le choix du débit à considérer revient au gestionnaire de la ressource selon son degré de tolérance au risque. Pour les îles de la Madeleine, étant donné le caractère irremplaçable des ressources en eau souterraine, un risque de salinisation faible est recommandé.

Cette section présente les résultats des simulations et propose des pistes de réflexion concernant l'exploitation durable de la ressource en eau souterraine pour chacune des îles munies d'un réseau de puits de captage municipaux. Il est à noter que le terme « débit optimisé » sera régulièrement employé dans le présent document, qui dans ce cadre signifie le débit maximal qu'il est possible de pomper en évitant la contamination des puits par l'eau salée. L'Annexe 12 apporte des précisions quant à l'interprétation des résultats.

#### **9.1.2.1 Île du Cap aux Meules**

La Figure 9.7 présente, pour chaque niveau de risque de salinisation, le débit de pompage journalier maximal qu'il est possible de prélever tout en évitant une contamination par l'eau salée (débit optimisé), pour l'ensemble des puits municipaux de l'île du Cap aux Meules. Une courbe distincte incluant l'effet des changements climatiques attendus en 2050 est également présentée. À titre comparatif, le débit de pompage total moyen de 2014 à 2020 (Section 3.1.3) est présenté, ainsi que l'histogramme des scénarios de la demande projetée à l'horizon 2050 (Section 0). Il est à noter que le puits PU5 n'a pas été considéré, car celui-ci n'est plus en fonction depuis 2015. Le débit de pompage actuel ainsi que la demande en eau à l'horizon 2050 sont tous les deux nettement en dessous du débit optimisé, et ce pour tous les niveaux de risque. C'est également le cas pour les simulations incluant l'effet des changements climatiques attendu en 2050, dont la courbe est assez semblable à celle qui les néglige. Pour le scénario de demande en eau à l'horizon 2050 le plus élevé (environ 4 500 m<sup>3</sup>/j), il y a une marge d'environ 3 500 m<sup>3</sup>/j pour atteindre la courbe d'optimisation avec un niveau de risque de 1 %. Cela suggère que le débit de pompage pourrait être augmenté pour ce réseau de puits en place en évitant une intrusion d'eau salée.



**Figure 9.7 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour l'ensemble des puits de l'île du Cap aux Meules**

Une analyse des résultats pour chacun des puits de pompage (Figure 9.8) permet de tirer quelques conclusions supplémentaires :

- Pour les puits P1, P4, P5, PU1, PU2, PU3, PU4, PU7, PU8, PU9 et PU10, les débits de pompage actuels et les scénarios de demande en eau projetés sont nettement plus faibles que les courbes de débit de pompage optimisées avec et sans changement climatique. Ces puits sont ceux dont le débit pourrait être augmenté en cas de besoin.
- Pour les puits P3, P7 et PU6, le débit de pompage actuel est situé près des valeurs de débit optimisé pour les risques de salinisation faible. Ces puits ont donc une faible marge pour l'augmentation des débits, si les gestionnaires veulent adopter une attitude conservatrice par rapport au risque. Comme ces puits semblent aussi vulnérables à la contamination par l'eau salée, leur débit ne devrait pas être augmenté et un suivi attentif de ces puits devrait être réalisé.
- Pour le puits P2, les courbes de débit de pompage optimisé recoupent le débit de pompage actuel pour des risques variant entre 30 et 50%. Cela signifie que si le pompage actuel est maintenu, alors il y aurait un risque de 30-50% de salinisation au nouvel état d'équilibre. Ainsi, ce puits serait aussi à surveiller.
- Pour les puits P6 et P8, les courbes de débit de pompage optimisé sont plus faibles que le débit de pompage actuel. Cela signifie que ces puits seraient déjà salinisés, ce qui n'est manifestement pas le cas, puisqu'aucun des puits de ce réseau ne pompe de l'eau salée. Cela est dû au fait que les simulations d'optimisations ont été réalisées en régime permanent tandis que cette situation à l'équilibre n'est pas encore atteinte. En effet, il a été démontré à la Section 9.1.1 que la remontée de l'interface eau douce – eau salée n'est pas encore complétée. La simulation des débits optimisés correspond donc à une situation qui ne s'est pas encore produite, mais vers laquelle

on se dirige. Ainsi, les résultats de simulations suggèrent que ces puits seraient éventuellement affectés par une intrusion d'eau salée si le débit demeure le même. Compte tenu des incertitudes du modèle, cette situation n'aura pas nécessairement lieu. Toutefois, ces puits semblent les plus vulnérables à la contamination par l'eau salée et devraient faire l'objet d'un suivi attentif.

Il est également à noter que pour la plupart des puits, les débits de pompage optimisés ne diminuent pas énormément avec la diminution du niveau de risque. Le débit optimisé total pour l'ensemble des puits de l'île du Cap aux Meules passe d'une valeur d'un peu plus de 9 000 m<sup>3</sup>/j pour un niveau de risque de 90 % à un débit autour de 8 000 m<sup>3</sup>/j pour un niveau de risque de 1 % (Figure 9.7). Dans cette situation, choisir un risque de salinisation faible n'implique pas de diminution importante du débit.

Enfin, les courbes de débit de pompage optimisées avec changements climatiques attendus en 2050 sont généralement assez semblables à celles sans changement climatique. Les changements climatiques causeraient une diminution inférieure à 1 % du débit de pompage total pour ce réseau pour les niveaux de risque les plus faibles (Figure 9.7). Pour les puits individuels, une diminution d'un maximum de 40 m<sup>3</sup>/jour peut être anticipée (Figure 9.8).

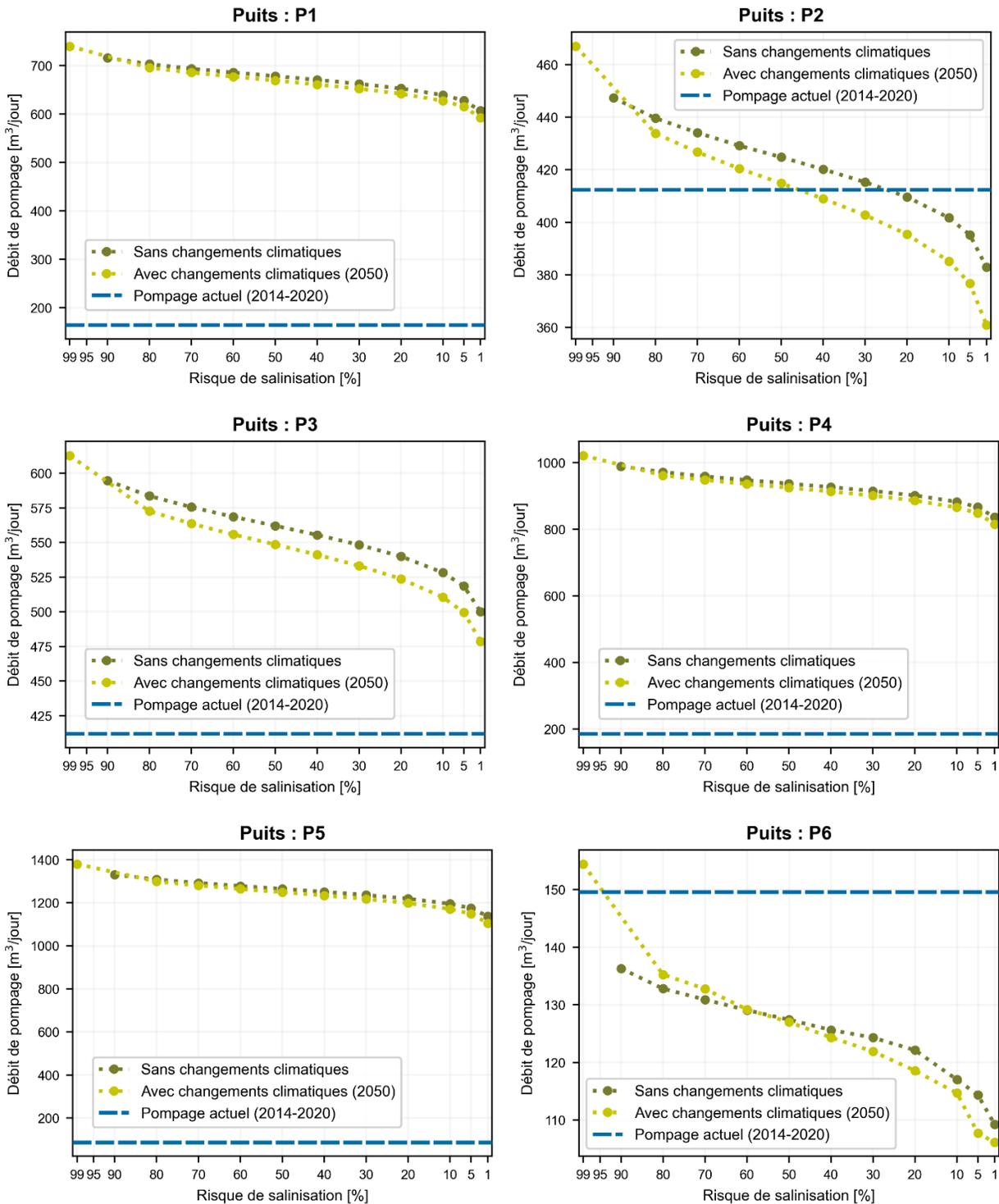


Figure 9.8 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île du Cap aux Meules

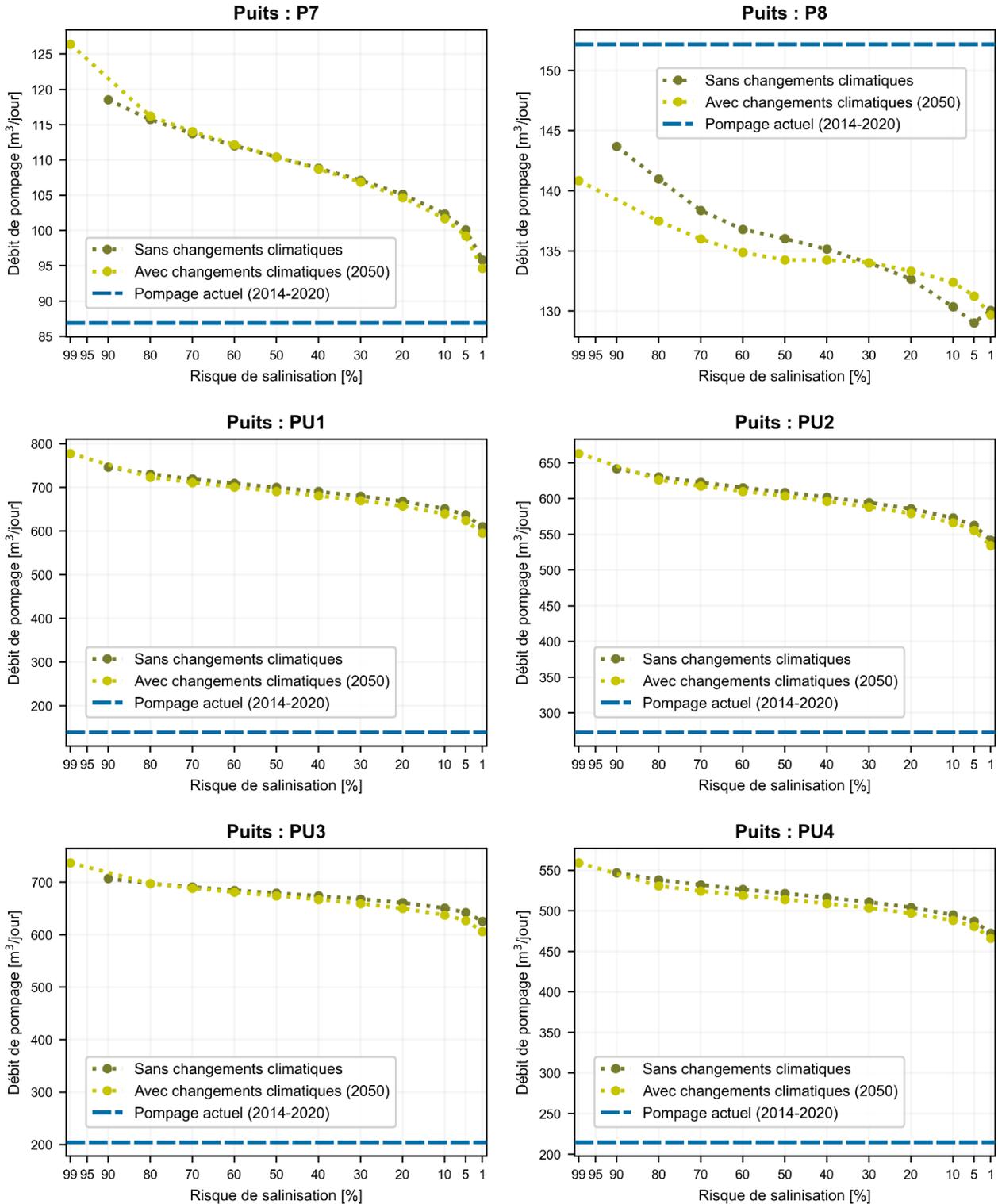


Figure 9.8 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île du Cap aux Meules (suite)

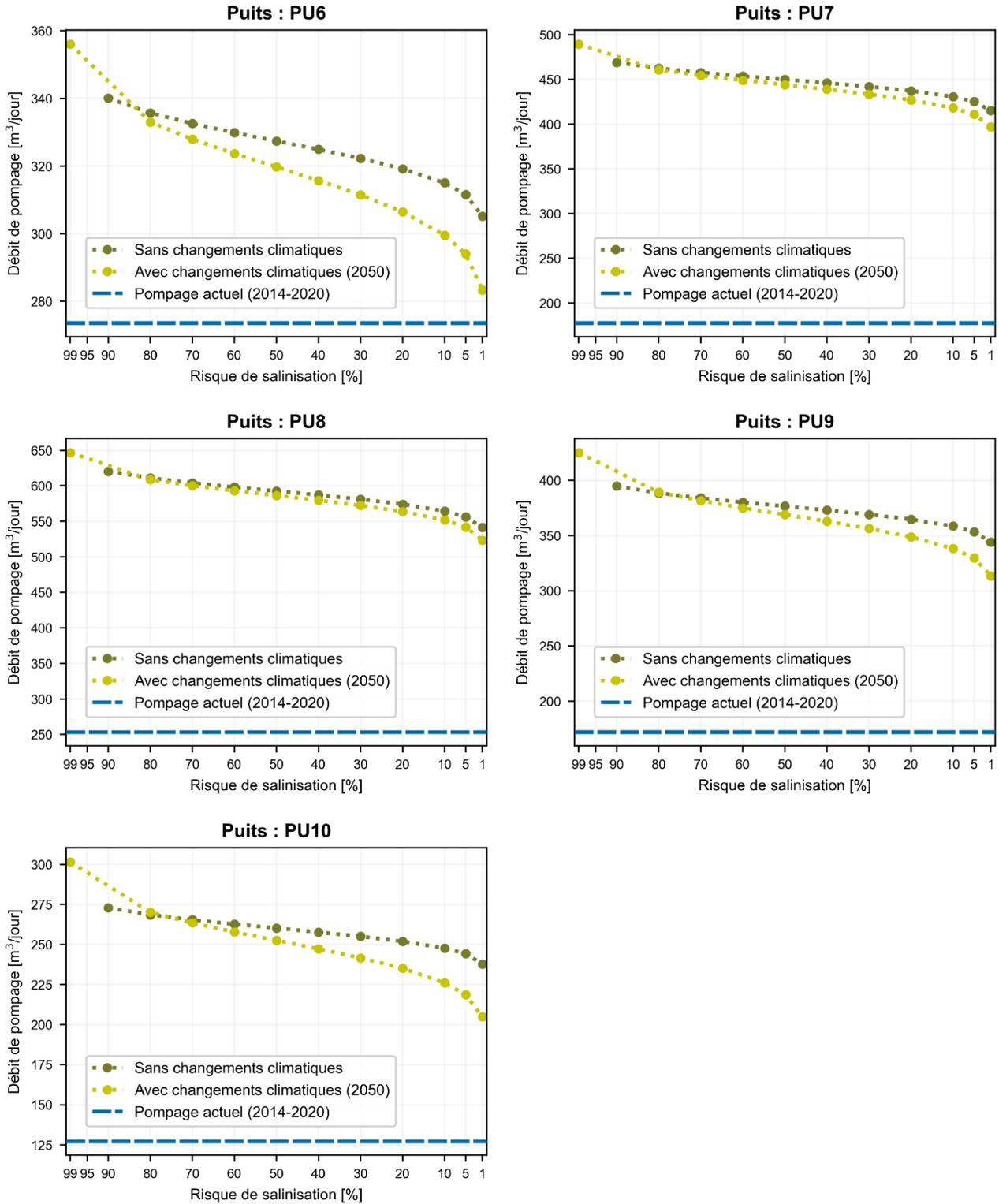
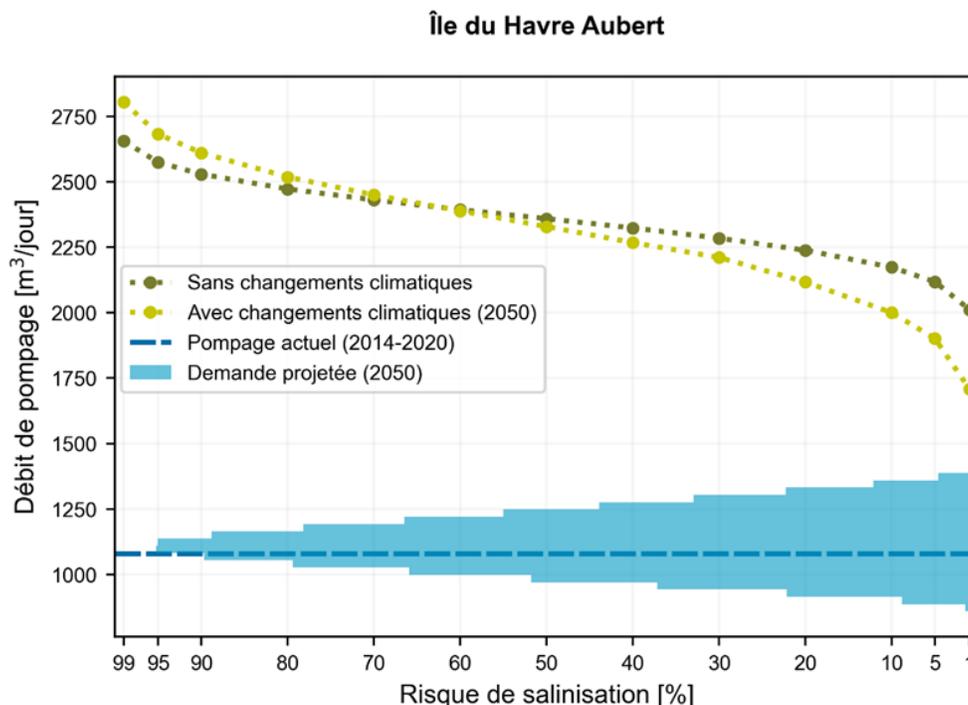


Figure 9.8 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île du Cap aux Meules (suite)

### 9.1.2.2 Île du Havre Aubert

En considérant l'ensemble des puits de l'île du Havre Aubert, le débit de pompage actuel ainsi que la demande en eau à l'horizon 2050 se retrouvent en dessous de la courbe de débit optimisé sans changements climatiques, et ce pour tous les niveaux de risque (Figure 9.9). Toutefois, la différence entre le débit de pompage actuel et le débit optimisé pour un risque de salinisation de 1 % est beaucoup plus faible que pour l'île du Cap aux Meules, soit d'un peu moins de 1 000 m<sup>3</sup>/j. Ainsi, le potentiel d'augmentation du débit de production pour cette île est plutôt limité avec le réseau actuel, d'autant plus que certains scénarios de demande en eau future se situent très près de la courbe de débit optimisé avec changements climatiques attendus en 2050.

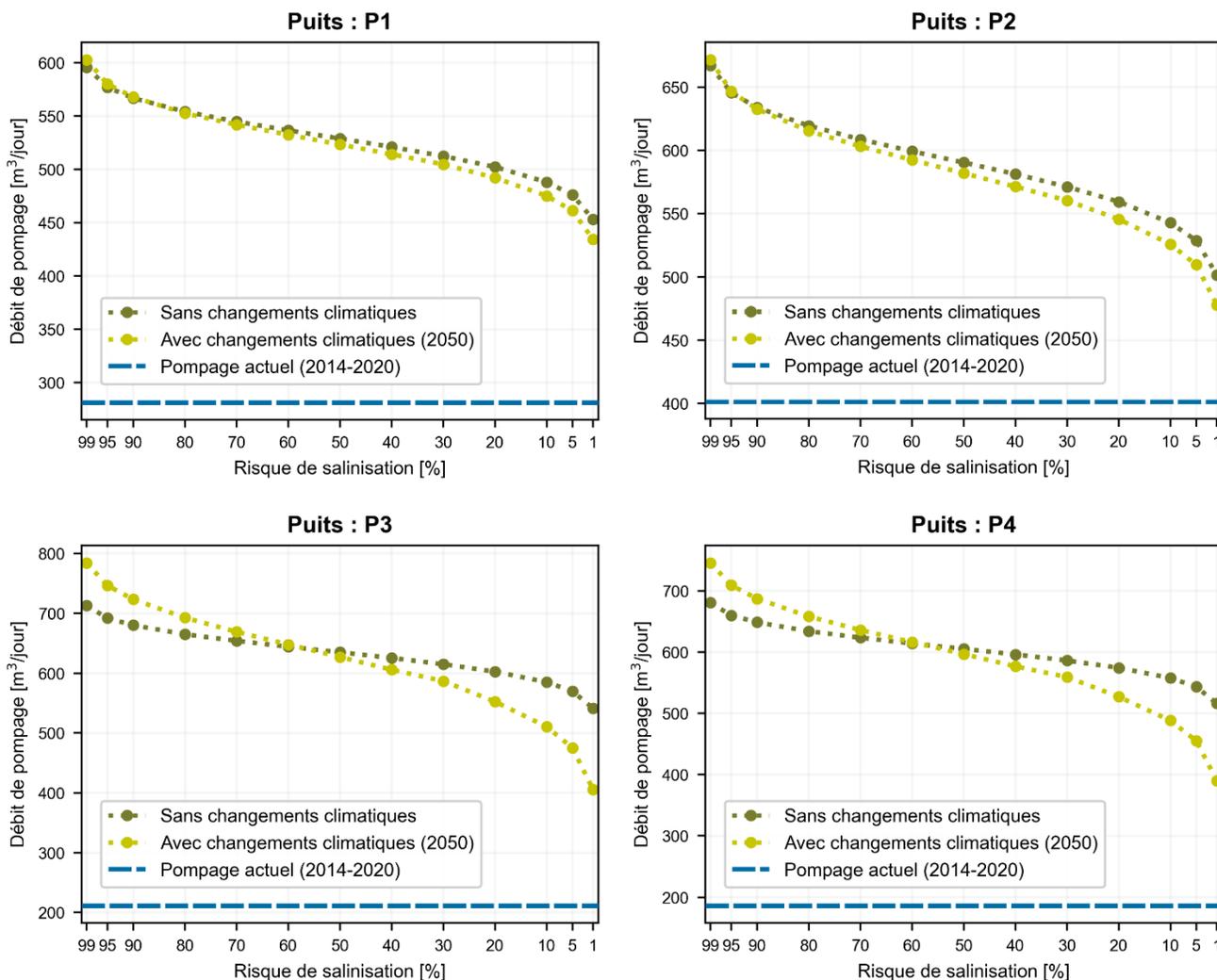


**Figure 9.9 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour l'ensemble des puits de l'île du Havre Aubert**

L'analyse des courbes de débit de pompage optimisé pour chacun des puits révèle qu'elles sont toutes très semblables (Figure 9.10). Contrairement à l'île du Cap aux Meules, le débit actuel est nettement plus bas que les courbes de débit optimisé pour tous les puits, avec des différences entre le débit de pompage actuel et le débit optimisé pour un niveau de risque de 1% qui sont plutôt uniformes, et de l'ordre de 200 à 300 m<sup>3</sup>/j. Cela indique que les prélèvements d'eau entre les puits sont assez bien distribués.

Une caractéristique notable des courbes de débit de pompage optimisé pour cette île concerne la diminution de débit associée à la diminution du risque de salinisation. En effet, bien que la diminution entre un niveau de risque de 99 % et 1 % soit équivalente à celle du Cap aux Meules (environ 1 000 m<sup>3</sup>/j), cela correspond environ au tiers du débit total associé au niveau de risque de salinisation le plus élevé (2 750 m<sup>3</sup>/j) (Figure 9.9).

Enfin, les changements climatiques attendus en 2050 ont pour effet de diminuer le volume d'eau maximal qu'il sera possible de pomper sur l'ensemble de ce réseau en évitant une contamination des puits. Cette diminution est non négligeable et atteint jusqu'à -15 % pour un risque de salinisation de 1 % (Figure 9.9). Cette diminution est principalement associée aux puits P3 et P4, avec des diminutions respectives de -25 % et -20 %, pour lesquels les changements climatiques auront davantage d'impact sur le débit optimisé (Figure 9.10).

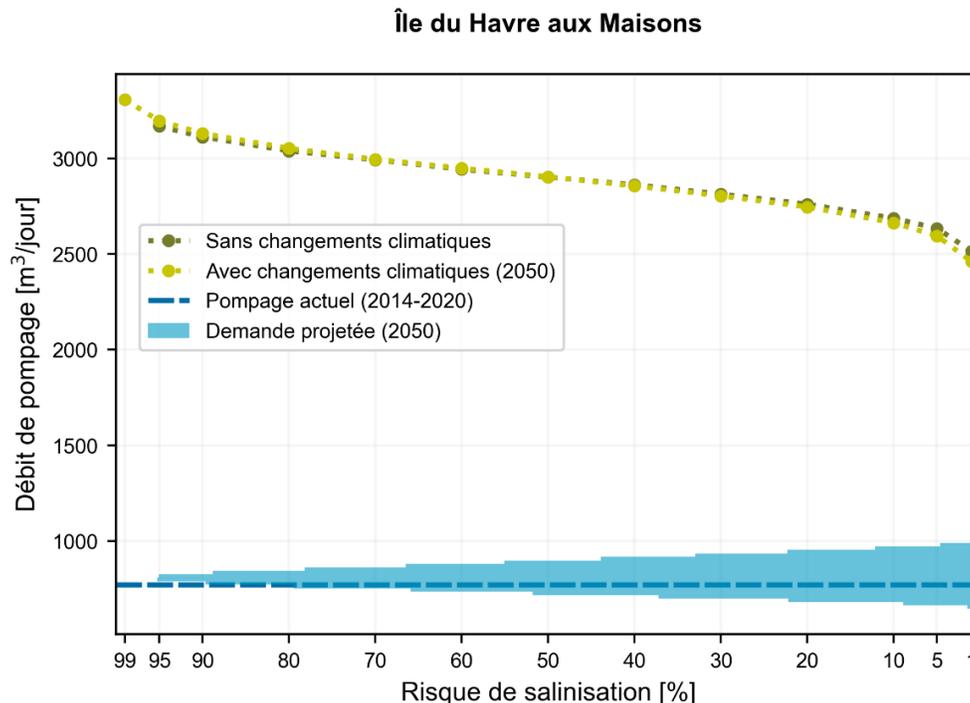


**Figure 9.10 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île du Havre Aubert**

### 9.1.2.3 Île du Havre aux Maisons

Comme pour les îles précédentes, en considérant l'ensemble des puits de l'île du Havre aux Maisons, le débit de pompage actuel ainsi que la demande en eau à l'horizon 2050 se retrouvent en dessous du débit de pompage optimisé, et ce pour tous les niveaux de risque (Figure 9.11). La différence entre le débit de pompage actuel et le débit optimisé pour un risque de salinisation de 1 % est de l'ordre de 1 750 m<sup>3</sup>/j pour les courbes avec et sans changements climatiques, qui sont pratiquement identiques.

Ainsi, il existe un certain potentiel d'augmentation du débit de production pour cette île, et ce même en considérant les scénarios de demandes en eau les plus élevés.



**Figure 9.11 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour l'ensemble des puits de l'île du Havre aux Maisons**

En regardant de près les résultats d'optimisation propres à chaque puits de pompage (Figure 9.12), on remarque une tendance similaire des différentes courbes de débit optimisé en fonction du risque de salinisation. Le débit actuel se retrouve nettement plus bas que les courbes de débit optimisé pour tous les puits, avec des différences de l'ordre de 300 à 400 m<sup>3</sup>/j pour les niveaux de risque les plus faibles, à l'exception des puits P3 et HAM-09-01-PP, dont les différences est de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/j. L'augmentation possible du débit de pompage pour ces deux puits est donc plus faible que pour les autres. Il est à noter que pour le puits P4, le débit de pompage pour la période de 2014-2020 est nul, car il n'était pas en fonction. Comme le puits a récemment été remis en fonction, il a été intégré à l'analyse.

On remarque que pour les puits HAM-09-01-PP et HAM-09-02-PP, les changements climatiques ont un comportement inverse aux résultats escomptés. Le débit optimisé augmente avec les changements climatiques au lieu de diminuer. Il faut cependant être prudent avec l'interprétation de tels résultats. Lors de la résolution du problème d'optimisation sous contraintes probabilistes, la linéarité exigée entre les paramètres (et variables de décisions) et les contraintes d'optimisation du modèle (voir Annexe 12 pour plus de détails) est une hypothèse forte qui est susceptible de ne pas être toujours parfaitement respectée. De plus, le calcul de l'incertitude attribuée au contour de salinité de 1 % (Annexe 12) est très sensible aux variations des variables de décisions et cette incertitude est déterminante dans le calcul du débit optimisé. Il est ainsi fort probable que les résultats étonnants obtenus aux puits HAM-09-01-PP et HAM-09-02-PP n'aient pas d'explication physique, mais qu'ils proviennent de la formulation mathématique du problème d'optimisation sous contraintes probabilistes et des hypothèses qu'elle exige.

Pour les quatre autres puits (P1, P2, P3 et P4), lorsque l'ensemble des puits du réseau sont considérés simultanément (Figure 9.11), les changements climatiques causent une diminution très faible du débit maximal qu'il sera possible de pomper en 2050 en évitant une contamination des puits (-2,1 % pour un risque de salinisation de 1 % pour l'ensemble des puits – Figure 9.11). On peut ainsi considérer à toutes fins pratiques que les changements climatiques, tels que modélisés dans le cadre de ce travail, n'auront pas d'impact significatif sur la quantité d'eau qu'il sera possible de prélever par le réseau municipal actuel pour ce réseau.

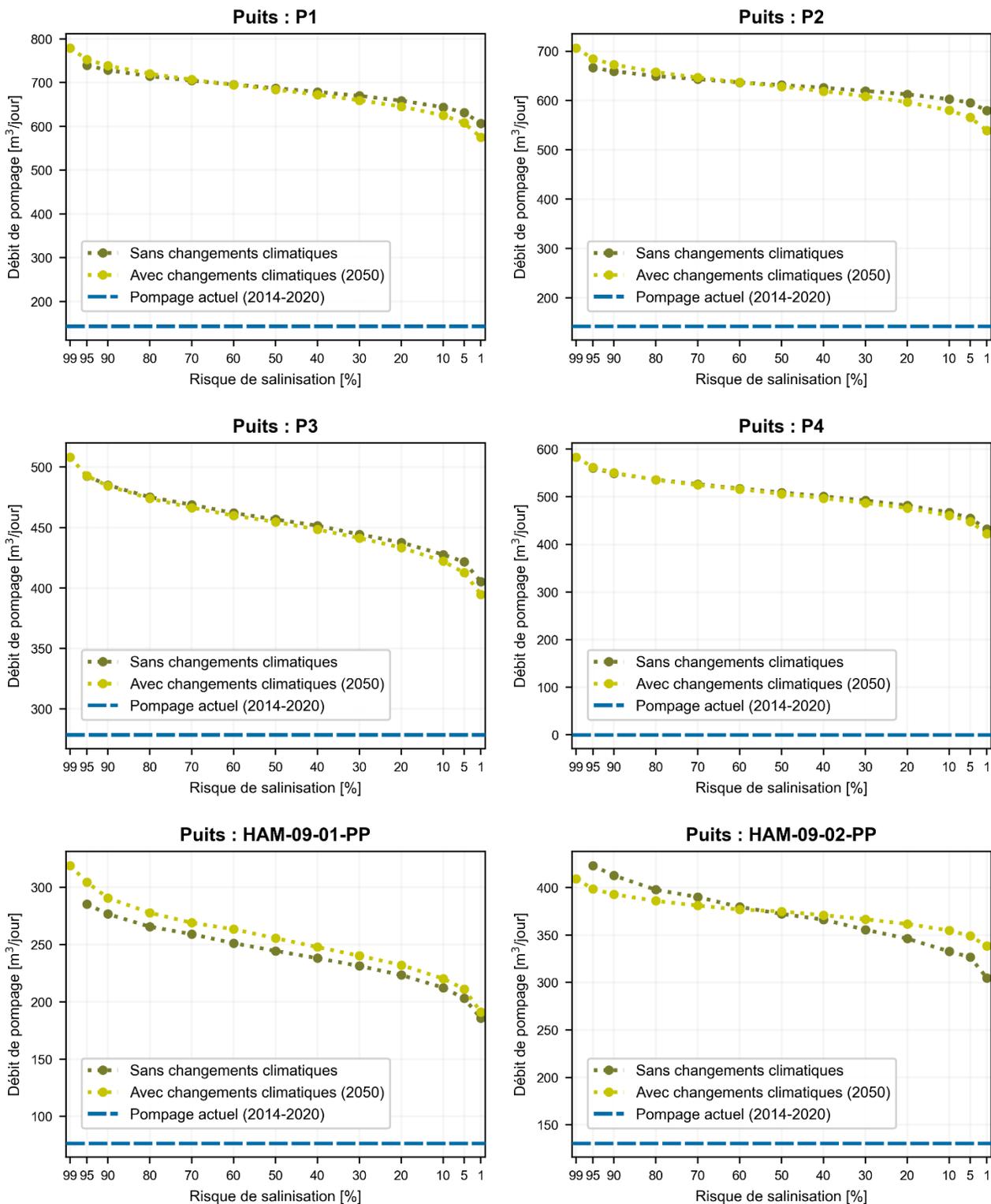
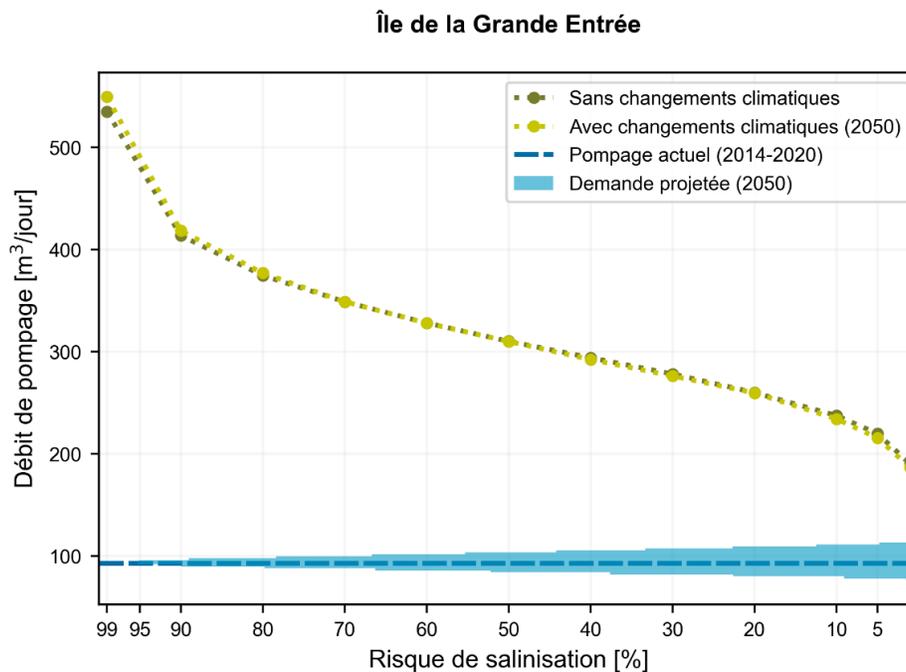


Figure 9.12 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île du Havre aux Maisons

#### 9.1.2.4 Île de la Grande Entrée

Tout d'abord, étant donné que le puits GE-09-03 n'est plus en fonction depuis 2015, celui-ci a été exclu de la démarche d'optimisation des pompages. En considérant l'ensemble des autres puits de l'île de la Grande Entrée, le débit de pompage actuel ainsi que la demande en eau à l'horizon 2050 se retrouvent en dessous des débits optimisés, et ce pour tous les niveaux de risque (Figure 9.13). Toutefois, la différence entre le débit de pompage actuel et le débit optimisé pour un faible risque de salinisation (1 %) est très faible, soit de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/j pour les courbes avec et sans changements climatiques. Ainsi, le potentiel d'augmentation du débit de production pour cette île est très limité avec le réseau de puits en place.



**Figure 9.13 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour l'ensemble des puits de l'île de la Grande Entrée**

En regardant de près les résultats d'optimisation propres à chaque puits de pompage (Figure 9.14), à l'exception des puits GE-09-01A et GE-09-04, la tendance des courbes de débit en fonction du risque de salinisation est similaire à celle du débit optimisé total pour le réseau présenté à la Figure 9.13. Pour les puits GE-09-01A et GE-09-04, le débit actuel recoupe la courbe vers 5% ou 15% de risque de salinisation respectivement, ce qui signifie que si le pompage actuel est maintenu, il y aurait un risque de 5% ou 15% de salinisation au nouvel état d'équilibre. Ainsi, ces puits vulnérables à la contamination par l'eau salée devraient être surveillés avec attention. Une surveillance accrue devrait aussi être assurée pour les puits FE-06-03, FE-06-06 et GE-09-05B, aussi vulnérables, pour lesquels le débit actuel se trouve très près des courbes de débit optimisées.

Ainsi, les puits de l'île de la Grande Entrée pourraient être davantage susceptibles à la contamination que les puits des autres îles de l'archipel. Un scénario d'exploitation durable de la ressource pour l'île de la Grande Entrée viserait à limiter et même à réduire dans la mesure du possible le pompage sur l'île avec le réseau de puits en place.

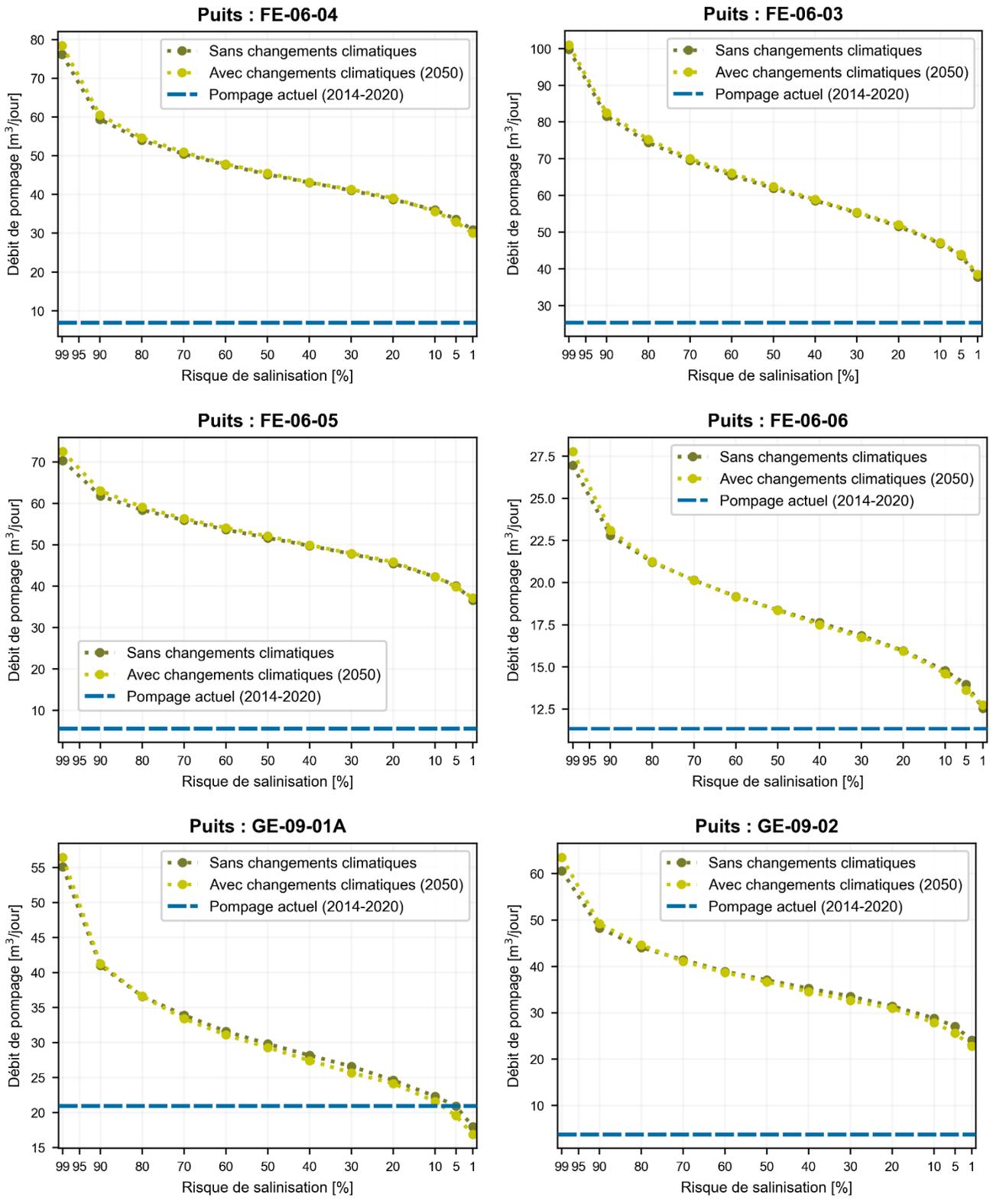
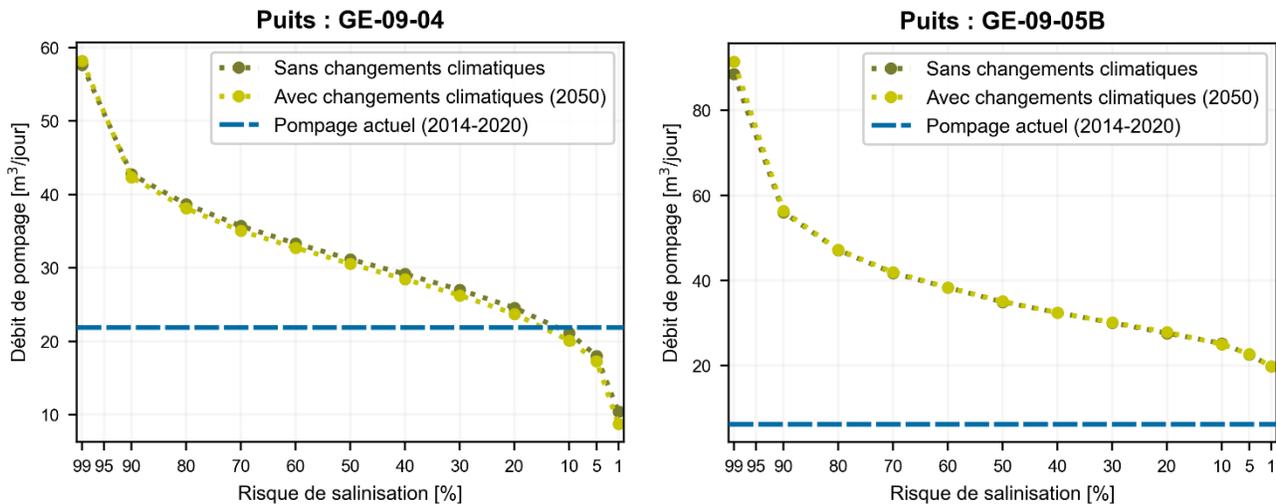


Figure 9.14 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l'impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l'île de la Grande Entrée



**Figure 9.14 : Débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation et de l’impact des changements climatiques attendus en 2050 pour chacun des puits de l’île de la Grande Entrée (suite)**

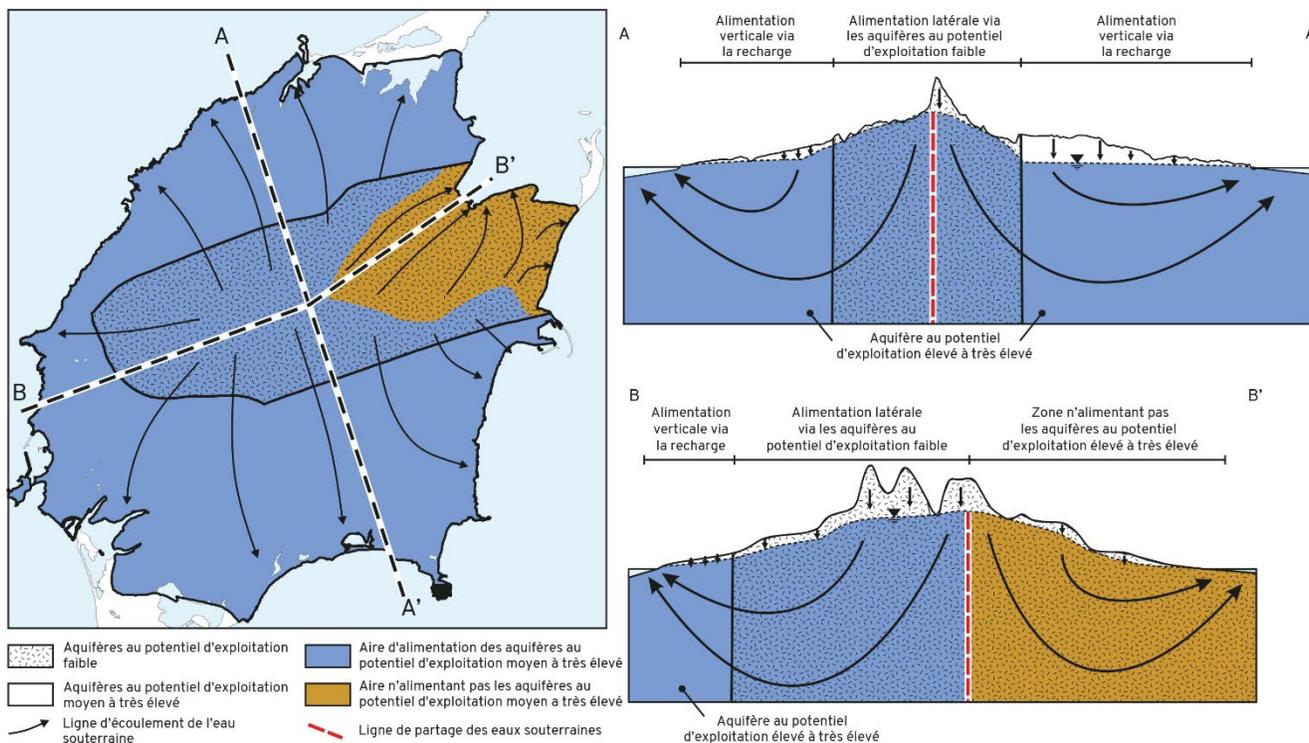
### 9.1.3 Délimitation des aires d’alimentation des aquifères exploitables

Étant donné que l’eau souterraine représente l’unique source d’approvisionnement en eau potable de l’archipel, il est souhaitable d’adopter un mode de gestion basé sur la protection des ressources en eau potable, plutôt que la gestion des sources d’eau potable, tel que prévu au Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2). En effet, en cas de besoin en eau supplémentaire ou dans le cas où un puits de pompage devrait être abandonné suite à une problématique de contamination, de nouveaux puits de pompage devraient être aménagés dans les aquifères dans de nouveaux secteurs. Une cartographie des portions du territoire des îles où l’eau souterraine est exploitée ou exploitable pourrait servir pour l’encadrement d’activités anthropiques menaçantes, par exemple, les activités d’exploration ou d’exploitation des hydrocarbures.

Aux îles de la Madeleine, les ressources en eau souterraine qu’il est possible d’exploiter pour un usage municipal sont contenues dans la lentille d’eau douce des aquifères les plus productifs de l’archipel, soit dans les roches des membres de l’Étang-des-Caps et de l’Étang-du-Nord, et dans les dépôts meubles chenalisés (Section 8.2.5). Compte tenu du réseau d’écoulement régional, les aires d’alimentation de ces aquifères couvrent l’ensemble de leur surface, en plus des zones de recharge dans les formations aquifères au potentiel d’exploitation faible situées en amont hydraulique, comme les roches volcaniques de la Formation du Cap au Diable. Ceci est clairement démontré par les aires d’alimentation des puits municipaux, notamment aux îles du Cap aux Meules et du Havre Aubert, qui recourent les roches de ces unités géologiques (Section 3.1.4).

Afin de cartographier les aires d’alimentation des aquifères exploitées ou exploitables, le module de traçage de particules MODPATH a été utilisé avec les modèles d’écoulements souterrains basés sur le programme MODFLOW-2005 (Section 7.5) pour tracer des lignes d’écoulement. L’ensemble des territoires où les traces des particules circulent à travers un aquifère à potentiel d’exploitation moyen à très élevé a été délimité. Dans ces aires d’alimentation, toute contamination des eaux souterraines pourrait affecter la qualité de l’eau des aquifères d’importance. Un exemple de cette méthodologie est

présenté à la Figure 9.15 pour l'île du Cap aux Meules. Les lignes d'écoulement bleues qui y sont représentées recoupent toutes, à un moment ou un autre le long de leur parcours, un aquifère au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. Ainsi, le territoire correspondant, hachuré en rouge, constitue l'aire d'alimentation qui devrait être protégée pour assurer la pérennité de la ressource. À l'opposé, les lignes d'écoulement violet ne circulent jamais à travers les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. Ainsi, ces zones offrent peu d'intérêt pour l'exploitation en eau potable pour des fins municipales.



**Figure 9.15 : Exemple de délimitation d'aires d'alimentation d'aquifères exploitables de l'île du Cap aux Meules. Sur la carte, les lignes d'écoulement dans la zone en bleu recoupent toutes, à un moment ou un autre le long de leur parcours, un aquifère au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. Ainsi, le territoire correspondant, en fond bleuté, constitue l'aire d'alimentation qui devrait être protégée pour assurer la pérennité de la ressource. À l'opposé, les lignes d'écoulement situées dans la zone marron ne circulent jamais à travers les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. Ainsi, ces zones offrent peu d'intérêt pour l'exploitation en eau potable pour des fins municipales. Sur la coupe A-A', l'eau souterraine contenue dans les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé est alimentée par la recharge et l'écoulement latéral provenant des aquifères au potentiel d'exploitation faible. Sur la coupe B-B', l'eau souterraine contenue dans la zone marron ne circule jamais dans un aquifère au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, et s'écoule directement vers la mer. De l'autre coté de la ligne de partage des eaux souterraines, l'eau souterraine contenue dans les aquifères au potentiel d'exploitation faible alimente les aquifères au potentiel d'exploitatio moyen à très élevé situés sur leur gauche, en aval hydraulique.**

Les aires d'alimentation sont délimitées, pour chacune des îles de l'archipel, sur la Carte 39 : Aires d'alimentation des aquifères exploitables, en annexe électronique, et à la Figure 9.16. Pour la Grosse Île, l'île aux Loups et l'île de la Grande Entrée, des formations aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé recouvrent tout le territoire. Ainsi, l'ensemble du territoire de ces îles constitue des aires

d'alimentation de ces aquifères productifs. Pour les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et du Havre Aubert, les aires d'alimentation occupent un vaste territoire. Ainsi, elles sont significativement plus vastes que la superficie occupée par les aquifères d'importance et recouvrent des sections d'aquifère au potentiel d'exploitation faible. Pour l'île du Cap aux Meules, c'est environ 90 % du territoire qui est concerné par l'aire d'alimentation. Pour les îles du Havre Aubert et du Havre aux Maisons, cette proportion diminue autour de 75 %. L'île d'Entrée est celle dont la proportion de l'aire d'alimentation est la plus faible, soit de 55 %.

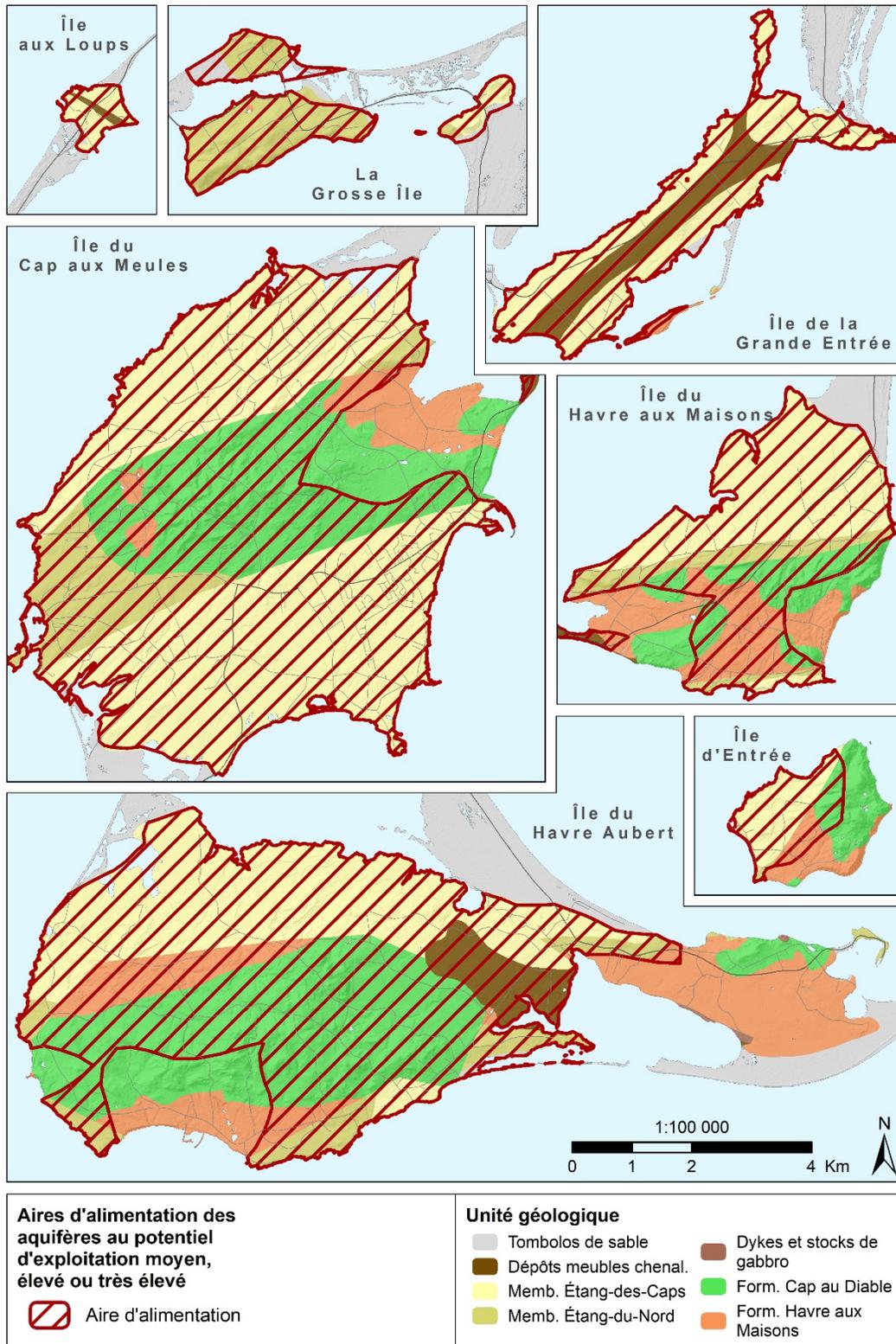


Figure 9.16 : Aires d'alimentation des aquifères exploitables

Bien que tout le territoire qui recouvre les aquifères d'eau douce au potentiel d'exploitation moyen à très élevé de l'archipel puisse être utilisé pour l'exploitation des eaux souterraines, cela n'est pas possible d'un point de vue pratique pour un usage municipal. En effet, pour obtenir un débit de pompage suffisant, l'épaisseur de la lentille d'eau douce doit être suffisamment importante, car le rabattement associé au pompage va causer une remontée de l'eau salée vers le puits. Plus la lentille est mince, moins le débit de pompage possible est grand, et plus le nombre de puits nécessaire augmente.

Les zones où la lentille d'eau douce est mince se retrouvent généralement en périphérie des îles, à proximité de la mer. Dans ces secteurs, l'eau souterraine est sur le point de faire résurgence dans la mer et se trouve ainsi éloignée des zones de recharge. Cette bande de territoire qui longe le littoral représente donc une partie de l'aquifère d'eau douce qui pourrait difficilement faire l'objet d'une exploitation municipale, car cela demanderait trop de puits. De plus, comme le chemin d'écoulement étant court jusqu'à la mer, une contamination des eaux souterraines dans ces secteurs aurait un impact plutôt local sur les ressources en eau souterraine. Ainsi, cette portion du territoire pourrait être soustraite des aires d'alimentation présentée ci-haut. La largeur de la bande pourrait être déterminée à l'aide de la carte de l'épaisseur de la lentille d'eau, en définissant une épaisseur critique au-dessous de laquelle une exploitation municipale n'est économiquement pas viable.

## 9.2 Constats et recommandations

### 9.2.1 Disponibilité des ressources en eau souterraine

Sous les îles de l'archipel, l'eau souterraine forme une lentille d'eau douce reposant par contraste de densité sur l'eau souterraine salée. L'épaisseur de la lentille d'eau douce varie de 0 à 500 m ou plus, avec une médiane d'environ 200 m (Section 8.3.3). L'épaisseur est maximale sous les buttes centrales et diminue de façon très abrupte à la limite avec les grès du Membre de l'Étang-des-Caps. Elle décroît ensuite lentement le long du plateau de grès pour devenir nulle en mer à quelques centaines de mètres de la côte. En ne considérant que les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé (roches des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord, et dépôts meubles chenalisés – Section 8.2.5), le volume d'eau douce disponible correspond à environ 2 700 Mm<sup>3</sup> pour l'ensemble des îles de la Madeleine (Section 8.3.4).

Pour considérer la quantité d'eau pouvant être exploitée de façon durable, il faut prendre en compte le taux de réalimentation (recharge ou écoulement latéral) des aquifères, ainsi que les écoulements environnementaux (*environmental flow*). En effet, une réalimentation adéquate est nécessaire afin d'éviter le déclin des niveaux de nappe et des réserves d'eau souterraine. Les écoulements environnementaux correspondent aux résurgences d'eau souterraine nécessaires pour préserver le maintien des cours d'eau et des écosystèmes qui en dépendent (de Graaf et coll., 2019). Un pompage d'eau souterraine trop important pourrait causer une diminution du niveau de la nappe phréatique et des écoulements environnementaux, et ainsi causer une diminution du débit de base des cours d'eau, le déclin des milieux humides et la diminution des résurgences en milieu marin.

La recharge annuelle calculée pour ces mêmes aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé est de 49,0 Mm<sup>3</sup>, ce qui représente moins de 2 % du volume total d'eau douce disponible (Section 8.4.6). L'eau prélevée par les diverses activités humaines est estimée à 2,2 Mm<sup>3</sup> pour une année, dont plus de

90 % proviennent de l'exploitation des puits municipaux (Section 3.2.1). C'est donc près de 5 % de la recharge annuelle des aquifères qui est prélevée chaque année, et moins de 0,1 % du volume d'eau disponible des aquifères. Ces résultats démontrent que les prélèvements sont faibles par rapport aux ressources disponibles et à leur réalimentation. Les taux de prélèvement semblent pérennes dans le temps puisque les variations de consommation en eau et de recharge projetées pour 2050 sont relativement faibles (hausse médiane de 1,5 % de la consommation – Section 0, et diminution médiane de 2 % de la recharge due aux changements climatiques – Section 8.4.3.2).

Les paragraphes ci-dessus définissent clairement que l'eau souterraine douce est disponible en quantité largement suffisante pour subvenir aux besoins des habitants des îles de la Madeleine. La problématique principale liée à son exploitation réside plutôt dans les limites imposées par le risque de salinisation des puits. Il est bien connu que dans les aquifères côtiers et insulaires, il est préférable de réduire le débit de pompage individuel des puits et de distribuer les prélèvements sur le plus grand nombre possible de puits afin de diminuer le rabattement de la nappe, et minimiser la remontée de l'interface eau douce – eau salée. Tel que démontré à la Section 9.1.1, les puits rapprochés s'influencent les uns les autres, ayant pour conséquence d'accélérer la remontée de l'interface eau douce – eau salée et d'augmenter le risque de salinisation. L'espacement entre les puits de pompage est d'autant plus important pour les petites îles où l'interface est peu profonde. L'aménagement de puits horizontaux pourrait aussi permettre d'atteindre le même objectif. Les captages devraient être situés le plus loin de la côte possible, et dans les endroits où l'épaisseur de la lentille d'eau douce est élevée. Les captages devraient être suffisamment éloignés les uns des autres pour que leur zone d'influence ne se superpose pas. Également, les puits ne devraient pas se situer le long d'une même ligne d'écoulement.

Du point de vue du gestionnaire de la ressource, ces recommandations reviennent à assurer un équilibre entre le nombre de puits, leur localisation et leur débit de pompage. Les outils quantitatifs développés par la modélisation numérique deviennent alors essentiels, car ce sont les seuls qui puissent simuler des changements par rapport à la situation actuelle, par exemple des scénarios différents de pompage des puits en place, l'arrêt ou l'installation de nouveaux puits. Toutefois, ces modèles devraient être améliorés régulièrement en utilisant les données de suivi (voir Section 9.2.3).

### **9.2.2 Conditions d'exploitation des réseaux de puits municipaux en place**

Les résultats de simulation numérique suggèrent que la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits d'alimentation municipaux n'a pas encore atteint l'équilibre, même si certains d'entre eux ont été mis en fonction il y a longtemps (Section 9.1.1). Les simulations indiquent que le pourcentage de remontée varie entre 56 et 87 % pour l'ensemble des puits de l'archipel. Les valeurs les plus faibles sont pour certains puits de l'île de la Grande Entrée, qui sont les plus récents, tandis que les valeurs les plus élevées sont pour les puits du secteur de Fatima sur l'île du Cap aux Meules qui datent des années 1970. La remontée actuelle de l'interface sous les puits de l'île du Havre Aubert ne peut pas être quantifiée par le modèle d'écoulement en régime transitoire, puisque lors du démarrage des puits, la position de l'interface est plus profonde que la base du modèle à 500 m sous le niveau de la mer. La mise à l'équilibre de l'interface sous ces puits étant très lente (plusieurs centaines d'années), il est probable qu'ils soient associés aux remontées les plus faibles des puits municipaux des îles de la Madeleine.

L'horizon pour atteindre 95 % de remontée varie beaucoup d'un puits à l'autre, avec des dates comprises entre 2045 et 2100 (et probablement beaucoup plus pour les puits de l'île du Havre Aubert). Ainsi, même si aucun des puits actuels n'est actuellement affecté par une intrusion d'eau salée, il n'est pas exclu que cela se produise dans le futur. D'ailleurs, les travaux de modélisation ont permis d'identifier que certains puits sur les îles du Cap aux Meules et de la Grande Entrée ont un débit de pompage qui pourrait causer leur salinisation à moyen terme (Section 9.1.2). Ces puits devraient donc faire l'objet d'un suivi détaillé, ce qui pourrait mener à la diminution de leur débit de pompage (voir Section 9.2.3 pour les détails). Certains autres puits sont aussi vulnérables à l'intrusion d'eau salée et disposent d'une faible marge entre leurs débits actuels et le débit maximal qu'il est possible d'exploiter sans les contaminer (Section 9.1.2). Ils devraient eux aussi bénéficier d'un suivi attentif et leur débit ne devrait pas être augmenté. Par mesure de précaution, comme cinq puits sur les huit actuellement en exploitation du réseau de distribution de l'île de la Grande Entrée sont concernés par les recommandations précédentes, tous les puits devraient bénéficier de ce suivi. De plus, comme la marge de manœuvre des puits de l'île du Havre Aubert est très faible entre les scénarios les plus élevés de la projection de la consommation en 2050 et les débits optimisés prenant en compte l'impact des changements climatiques en 2050, advenant toute modification à la hausse des débits d'exploitation sur cette île, un suivi attentif devrait aussi être accordé à ces puits.

En comparant les débits maximums qu'il serait possible d'exploiter avec le réseau de puits en place avec les débits actuels et la consommation en eau projetés pour 2050, il est possible d'évaluer la marge disponible d'augmentation des pompages pour chaque réseau et pour chacun des puits. Il est également possible d'évaluer si les débits de pompages sont bien distribués entre les puits de pompage au sein d'un champ de captage. Cette analyse a révélé que pour les niveaux de risque le plus faible, les réseaux des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons disposent d'une marge importante, tandis que celui de l'île du Havre Aubert dispose d'une très faible marge. C'est également le cas pour l'île de la Grande Entrée, où l'augmentation des débits est difficilement envisageable étant donné la faible profondeur de l'interface. Même si la marge disponible pour certains réseaux est faible, cela ne signifie pas qu'un volume d'eau supplémentaire ne puisse être exploité sur cette île, mais simplement que de nouveaux captages seraient nécessaires pour le faire. En effet, il a été discuté à la Section 9.2.1 que le volume d'eau disponible sur les îles est largement suffisant pour les usages de l'eau actuels et ceux projetés en 2050. Cependant, si l'installation de nouveaux puits s'avérait nécessaire, ils devraient être distancés des puits existants.

Il est à noter que les simulations d'exploitation durable reposent uniquement sur le risque de salinisation des puits et ne prennent pas en compte les écoulements environnementaux définis dans la section précédente. Les pertes écologiques associées à la diminution du débit de base des cours d'eau, le déclin des milieux humides et la diminution des résurgences en milieu marin dus à un pompage excessif n'ont pas été considérées dans cette analyse. Ainsi, les débits de pompage maximum qu'il serait possible d'exploiter avec les réseaux de puits en place pourraient être considérés comme durables vis-à-vis à l'intrusion d'eau salée, mais ne le seraient pas par rapport aux écoulements environnementaux. Ces derniers devraient donc être considérés avant d'augmenter significativement le débit d'exploitation des réseaux existants.

Enfin, tel que mentionné dans la Section 7.6, les modèles développés dans le cadre de ce projet ne peuvent être utilisés directement afin de déterminer les débits de pompage des ouvrages de captage,

car leurs caractéristiques spécifiques n'ont pas été intégrées, compte tenu de l'échelle de travail régionale utilisée pour ce projet. De nouveaux modèles spécifiques à un champ de captage seraient nécessaires à cette fin.

### **9.2.3 Suivi des sources et des ressources en eau**

Le suivi des sources d'eau potable et des ressources en eau souterraine constitue un moyen essentiel d'assurer la disponibilité et la qualité des eaux souterraines à long terme. L'analyse des données compilées dans le cadre de ce projet a permis d'observer que plusieurs suivis réalisés par différents organismes au fil du temps ont souffert d'interruption ou contenaient des données aberrantes. Des problématiques liées à l'archivage des données ont aussi été décelées. Ainsi, il est recommandé de porter une attention particulière au fonctionnement des équipements et à leur calibration. Une analyse périodique des données recueillies pourrait également permettre un diagnostic rapide des problèmes, en plus d'identifier des changements dans les tendances observées et d'effectuer des constats en lien avec l'évolution de la quantité et la qualité des eaux souterraines.

#### **9.2.3.1 Suivi des sources d'eau potable**

La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine effectue un suivi de ses systèmes d'exploitation et de distribution d'eau potable à l'aide de systèmes de télémétrie. Il est recommandé de poursuivre ces suivis qui permettent de collecter des données importantes sur les sources d'eau potable ainsi que la ressource en eau souterraine. Pour les puits qui ont été identifiés comme vulnérables à une intrusion d'eau salée, une analyse annuelle des données provenant du système de télémétrie devrait être réalisée. La mise en graphique de données de conductivité électrique de l'eau, de niveau d'eau et de débit de pompage permettrait d'identifier d'éventuelles tendances et d'ajuster le débit de pompage des puits si nécessaire.

Des suivis de l'eau brute exploitée par les puits municipaux pourraient être envisagés pour les puits d'alimentation précédemment jugés vulnérables à la contamination par l'eau salée. Les échantillons devraient être prélevés, chaque saison, à même les puits, et non pas dans les réservoirs qui constituent un mélange des eaux prélevées par les différents puits. Ce suivi permettrait de déceler d'éventuelles augmentations d'eau salée. L'utilisation du ratio chlorure/bromure permettrait d'identifier la source des chlorures, pour différencier les contaminations issues des sels de déglacage aux intrusions d'eau salée d'origine marine. Ces évaluations seraient complémentaires aux mesures de conductivité électrique récoltées en continu dans les puits et constitueraient une barrière en cas de défectuosité de l'appareillage.

Les puits d'alimentation de l'Étang-du-Nord, situés en aval de la route 199, pourraient aussi être intégrés dans ce suivi, car des faciès géochimiques de type Na-Cl ont été observés dans ce secteur et un certain degré de contamination aux sels de voirie y est suspecté (Section 8.5.1). L'utilisation d'un traceur isotopique (isotopes stables du chlore), en complément aux ratios chlorure/bromure, permettrait d'identifier l'origine des chlorures. Le suivi permettrait aussi de voir l'évolution de cette problématique et d'établir si un plan de gestion des sels de voirie devrait être mis en place.

#### **9.2.3.2 Suivi de l'interface eau douce – eau salée**

Présentement, il existe six puits du RSESQ exploités par le MELCC qui permettent un suivi piézométrique et de l'interface eau douce – eau salée, dont cinq sont situés sur l'île de la Grande Entrée. Tout comme les données collectées par la municipalité, il est recommandé de poursuivre la récolte de ces mesures

qui sont essentielles pour comprendre l'évolution des conditions hydrogéologiques, notamment celles en lien avec les changements climatiques.

Dans l'éventualité où le réseau de suivi du RSESQ serait bonifié, plusieurs recommandations sont à formuler. Le choix de la méthode de suivi dépend de plusieurs facteurs et doit être effectué selon l'objectif de suivi visé. Ici on peut distinguer un suivi de l'interface eau douce – eau salée en conditions naturelles, ou un suivi de l'interface eau douce – eau salée en lien avec l'exploitation des puits municipaux.

Pour le suivi de l'interface en conditions naturelles, plusieurs méthodes géophysiques présentées à la Section 4.1.3 ont été évaluées jusqu'à maintenant aux îles de la Madeleine (sondage de résistivité électrique, tomographie de résistivité électrique (TRE) et méthode électromagnétique transitoire (TDEM – *Time Domain Electromagnetic Method*). Aucune d'entre elles ne semble permettre un suivi précis de l'interface sur l'ensemble du territoire de l'archipel. De plus, comme les relevés demandent d'être validés, ils doivent être utilisés conjointement avec des méthodes de mesures directes de l'interface. Enfin, les méthodes TRE et TDEM ont une profondeur d'investigation limitée qui restreint leur utilisation pour plusieurs des îles de l'archipel. Jusqu'à maintenant, ces méthodes se sont révélées utiles que sur l'île de la Grande Entrée et en périphérie des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons. Leur utilisation demande du matériel et du personnel spécialisés et coûteux, et le déploiement sur le terrain est complexe.

Les méthodes géophysiques en forage ont une précision nettement meilleure. Toutefois, leur utilisation peut être complexe et leur utilisation est principalement au stade de recherche et développement ou au stade de démonstration. Le déploiement de chaînes d'électrodes en forage est une technologie en émergence, mais le coût d'aménagement peut être très élevé compte tenu du peu de fournisseurs de ce type de produits. De plus, la durée de vie des équipements n'a pas encore été évaluée. Enfin, les résultats qu'on obtient des diagraphies électromagnétiques sont l'équivalent de ceux des profils de conductivité électrique de l'eau en puits ouvert. Le principal avantage des diagraphies est qu'elles peuvent être utilisées dans des puits aménagés sans crépines, comme des trous avec des tubes pleins en PVC. Ce genre de puits est rarement aménagé ou disponible.

Pour ces raisons, le suivi de l'interface peut généralement être réalisé avec efficacité à l'aide de puits d'observation. Pour un suivi de nappe en condition naturelle, des puits avec de longues crépines sont le plus souvent utilisés, mais ceux-ci ne dépassent habituellement pas la profondeur de l'interface. En effet, en plus du problème de biais mentionné précédemment à la Section 5.2.1.2, les coûts de prolonger le puits dans l'eau salée n'est pas justifié. Malgré le biais qui peut être induit par les puits d'observation, ils permettent de réaliser des profils de conductivité de manière peu coûteuse. Ainsi, pour les îles de la Madeleine, c'est le type de puits à privilégier pour le suivi de l'interface en conditions naturelles afin d'optimiser les coûts pour une meilleure distribution des puits d'observation sur les îles. La profondeur des puits ne devrait pas être supérieure à la base de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau salée.

Pour le suivi à proximité des puits de captage, l'évaluation présentée ci-haut concernant les méthodes géophysiques demeure valide. Ainsi, la méthode de suivi qui apparaît la plus simple et fiable, tout en étant la moins coûteuse, est l'utilisation de puits d'observation. Il s'agit d'une technologie disponible au Québec et maîtrisée par plusieurs entrepreneurs, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes présentées préalablement. Toutefois, l'utilisation de longues crépines est à proscrire. Ainsi, un seul puits, avec une courte crépine pourrait être installé à proximité du puits de pompage (mais à une profondeur plus élevée)

sans la zone d'eau douce et dans lequel des mesures de conductivité électrique par sonde ou par analyse d'échantillons pourrait être effectuées. De manière plus avantageuse, un forage pourrait être aménagé en puits multiniveaux, en s'assurant que la longueur des crépines de chacun des puits soit courte. Cette dernière option s'apparente à la méthode utilisée pour le champ de captage de la ville d'Amsterdam (Nienhuis et coll., 2010, Kamps et coll., 2016). Le puits d'observation devrait se situer le plus près possible du puits de pompage, car c'est là que la remontée de l'interface sera la plus importante et où des concentrations en matière totale dissoute seront observées en premier en cas d'intrusion d'eau salée par le bas. Ces méthodes sont également celles qui sont recommandées par la Food and Agriculture Organisation of the United Nations (1997).

## **9.2.4 Changements climatiques**

### **9.2.4.1 Impacts sur les ressources**

L'impact des changements climatiques sur le volume d'eau souterraine disponible aux îles de la Madeleine n'a pas été évalué spécifiquement dans le cadre de cette étude. Toutefois, en considérant les changements climatiques attendus, en utilisant les résultats de modélisation de la recharge, ainsi qu'en consultant la littérature scientifique pertinente, il est possible d'anticiper leurs effets sur la disponibilité des ressources.

#### *Le climat*

Les hausses de température et les variations des précipitations pourraient avoir des impacts à long terme sur la recharge des aquifères. La recharge pourrait notamment être favorisée par des hivers plus doux et des chutes de pluie plus abondantes (comparativement aux chutes de neige). Par contre, des températures plus élevées en été favoriseraient l'évapotranspiration, diminuant ainsi la recharge estivale. Les prévisions calculées à l'horizon 2050 à l'aide des 72 scénarios climatiques d'Ouranos (Section 2.3.7.3) et le modèle SWB2 (valeurs calibrées avec MODFLOW-2005) (Section 8.4.3.2), indiquent que la médiane de la recharge annuelle de tous les scénarios passerait de 566 mm/an à 554 mm/an, correspondant à une diminution de seulement 2 %. En considérant les scénarios climatiques extrêmes, les prévisions de la recharge seraient très variables, oscillant entre 403 mm/an et 705 mm/an, soit de -29 % à +24 % comparativement à la recharge actuelle. Ces prédictions de recharge annuelle et la grande variabilité sont semblables à ce que Lemieux et coll. (2015) ont obtenus pour l'horizon 2040, soit une très légère augmentation moyenne de 2 % et des variations de -31 % et +20 % selon les scénarios.

Une diminution de la recharge aurait pour effet de provoquer une baisse de la nappe, et par conséquent, une remontée de l'interface eau douce – eau salée (voir la Figure 5.25a de la Section 5.2.1). La réserve d'eau disponible en serait ainsi diminuée et le risque de salinisation des puits augmenté. Toutefois, en considérant le pire scénario climatique (baisse de la recharge annuelle de -31 %), Lemieux et coll. (2015) ont modélisé pour l'île de la Grande Entrée une diminution de l'élévation de la nappe qui atteindrait -6,7 cm en 2040, causant une remontée de l'interface saline de 1,8 m, mais pouvant atteindre 5,7 m en 2100, ce qui n'apparaît pas comme un impact significatif sur les ressources en eau.

#### *Le niveau de la mer*

Tel que discuté à la Section 2.3.8, la remontée médiane du niveau marin relatif, due à une combinaison de la remontée de la mer et à la subsidence des îles, atteindrait 0,19 m ± 0,12 m d'ici 2050 (Barnett et coll., 2017). L'immersion de terres et la perte de la superficie des îles auraient pour effet de diminuer les

réserves d'eau douce (voir la Figure 5.25b de la Section 5.2.1). D'ici 2040, pour l'île de la Grande Entrée, l'interface eau douce – eau salée se déplacerait latéralement jusqu'à 36 m vers l'intérieur des terres (Lemieux et coll., 2015). Pour la même période, l'interface se déplacerait aussi verticalement, avec des remontées variables, accentuées à proximité des côtes : par exemple de 1,3 m à 350 m des côtes jusqu'à 5,5 m à 50 m des côtes. Ainsi, à l'exception d'en bordure de mer, l'impact sur la disponibilité en eau douce semble relativement faible.

#### *Érosion côtière*

L'érosion et le recul des côtes sont une préoccupation majeure aux îles de la Madeleine. Les falaises rocheuses et les terrasses de plage y sont sensibles aux cycles de gel et dégel, à l'effet des vagues et aux vents puissants (Bernatchez et coll., 2008). Pour la période de 1963 à 2001, des taux d'érosion jusqu'à 0,79 m/an ont été observés pour le secteur de l'île aux Loups, alors que des taux de 0,46, 0,31 et 0,09 m/an ont été obtenus respectivement pour les falaises de grès, les plages et les dunes de sable des îles du Havre Aubert et du Cap aux Meules (Bernatchez et coll., 2008). Pour l'île du Cap aux Meules, un recul de la côte de près de 38 m est prédit pour 2050, ce qui correspond à un taux d'érosion de 0,77 m/an (Bernatchez et coll., 2008). En considérant ce taux d'érosion, les simulations réalisées par Lemieux et coll. (2015) prédisent un impact mineur sur la position de l'interface eau douce – eau salée. Ainsi, à part pour les secteurs très près de la mer, l'érosion côtière n'apparaît pas comme une problématique majeure pour la disponibilité de l'eau souterraine et n'a pas été considérée lors des simulations d'exploitation des puits municipaux en 2050.

#### *Impacts combinés*

En combinant les impacts d'une recharge diminuée, d'une remontée relative du niveau marin et de l'érosion côtière, la hausse de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée pour l'île de la Grande Entrée pourrait atteindre 3,5 m en 2040, et même davantage en bordure de mer (Lemieux et coll., 2015). De plus, même si les changements climatiques étaient interrompus en 2040, les simulations ont montré que l'interface continuerait à remonter jusqu'en 2100 et pourrait atteindre 5,3 m. Comme les puits municipaux des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert et du Havre aux Maisons ne se situent pas à proximité des côtes, leur vulnérabilité face aux changements climatiques est considérée comme faible. La vulnérabilité est un peu plus élevée pour les puits municipaux de l'île de la Grande Entrée et des puits privés dans les cordons dunaires, où la lentille d'eau douce est plus mince.

#### **9.2.4.2 Impact sur les ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place**

Bien que l'effet des changements climatiques sur le volume d'eau douce disponible dans les aquifères n'a pas été évalué, leur effet (remontée relative du niveau de la mer et variation de la recharge des nappes) pour l'horizon 2050 a été considéré pour évaluer le volume d'eau exploitable à partir des réseaux municipaux. Les résultats révèlent que les changements climatiques attendus vont très légèrement diminuer la quantité d'eau additionnelle disponible pour les réseaux de distribution des îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée, de l'ordre de quelques points de pourcentage et moins. Cette tendance est toutefois plus importante pour l'île du Havre Aubert, qui devrait voir sa quantité d'eau additionnelle exploitable par le réseau de puits en place diminuer d'environ 15%.

#### **9.2.5 Qualité de l'eau souterraine**

Les analyses sur la potabilité de l'eau de la Section 8.5.2.1 ont révélé qu'une proportion relativement importante des échantillons d'eau de puits ne respectaient pas les normes établies pour protéger la santé des consommateurs, notamment pour les paramètres microbiologiques. C'était le cas pour 45 % des puits étudiés en 2019 et 2020 dans le cadre du présent projet (20 puits sur 44). Il faut toutefois considérer que de nombreux échantillons provenaient de puits qui ne sont plus utilisés et entretenus pour l'alimentation en eau potable domestique. Si on considère les échantillons d'études antérieures, 7 % des puits n'étaient pas conformes (19 puits sur 271), mais les données sont parfois anciennes et ne sont pas représentatives du portrait de la qualité de l'eau actuelle.

Le taux élevé de puits non conformes n'est pas différent de ce qui a été observé dans d'autres régions des PACES, par exemple celles de Vaudreuil-Soulanges, de la Mauricie et des bassins versants des rivières Nicolet et Saint-François, où 33, 39 et 45 % des puits domestiques analysés, respectivement, ne respectaient pas les normes pour les paramètres microbiologiques (Leblanc et coll., 2013; Larocque et coll., 2015a; Larocque et coll., 2015b). Ces contaminations sont probablement associées à des sources locales de contamination, une mauvaise installation ou un mauvais entretien des puits. Ainsi, un manque de sensibilisation du public est possiblement en cause, puisque près de la moitié des propriétaires confirmaient ne pas connaître les procédures de nettoyage ou de décontamination de leur puits (Leblanc et coll., 2013).

Il serait ainsi souhaitable de sensibiliser davantage les propriétaires de puits domestiques sur l'importance d'entretenir adéquatement leurs installations de production d'eau potable. La page web *La qualité de l'eau de mon puits* du MELCC (2022b) explique les procédures à suivre. Les propriétaires de puits domestiques devraient aussi être encouragés à procéder à l'analyse régulière de leur eau par un laboratoire accrédité au moins deux fois par année pour les paramètres microbiologiques (au printemps et à l'automne), tel que recommandé par le MELCC (2022b).

Santé Canada (2019a) recommande de consommer une eau ayant une concentration en manganèse inférieure à 0,12 mg/L pour éviter des effets sur le développement et le comportement neurologiques, ainsi que des déficits de mémoire, d'attention et de motricité. Les échantillons d'eau analysés dans le cadre de ce projet ont révélé que 21 % (10 puits sur 47) ne respectaient pas cette recommandation (proportion similaire pour les analyses des études antérieures – Section 8.5.2.2). Dans les secteurs non desservis par les réseaux de distribution municipaux d'eau potable, comme la Grosse Île, les propriétaires des puits domestiques devraient être sensibilisés davantage à cette problématique et être encouragés à faire analyser leur eau. Un dispositif d'osmose inverse, installé directement au robinet, constitue la technique la plus efficace et la plus fiable pour réduire la concentration de manganèse dans l'eau potable (Santé Canada, 2019b). Les adoucisseurs d'eau et les filtres à sable vert pour manganèse peuvent aussi être installés au point d'entrée de l'eau de la résidence.

### **9.2.6 Plan de protection des ressources en eau souterraine**

Les normes actuelles en lien avec le Règlement sur le prélèvement des eaux souterraines et leur protection (Q-2, r. 35.2) sont articulées autour du principe de protection des sources d'eau potable. L'approche vise notamment à dresser le portrait des connaissances sur l'état des sources d'eau potable, et de déterminer de manière exhaustive les risques de contamination que posent les activités anthropiques pouvant altérer la qualité de l'eau exploitée par les prélèvements municipaux. Les activités

anthropiques réfèrent « à des lieux ou à des établissements qui, dans le cours normal de leur fonctionnement, libèrent ou sont susceptibles de libérer dans l'environnement des contaminants chimiques ou microbiologiques » (MELCC, 2018). L'approche considère également les événements potentiels, c'est-à-dire « une situation imprévisible qui est associée à une activité anthropique et qui représente un risque de contamination chimique ou microbiologique pour l'eau souterraine. Il peut notamment s'agir d'un déversement accidentel à la suite d'une fausse manœuvre, d'un feu, d'une explosion ou d'un événement météorologique pouvant affecter une activité anthropique » (MELCC, 2018). Les menaces que posent ces activités et événements sont évaluées, afin de déterminer leur potentiel de risque, selon leur gravité sur la santé des consommateurs et leur fréquence de libération des contaminants dans l'environnement pour les activités, ou leur probabilité que l'événement potentiel se produise. Cette analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable a été réalisée pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine en parallèle à la présente étude (Tremblay et coll., 2022). Elle a d'abord déterminé les aires de protection des prélèvements municipaux, incluant les aires d'alimentation des sources, par modélisation numérique en se servant du cadre de connaissance de base sur les aquifères exploités, établi par le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*. Elle a ensuite inventorié et évalué le risque des nombreuses activités humaines potentiellement polluantes pratiquées dans ces aires de protection, par exemple des installations septiques, des réservoirs d'hydrocarbures, diverses pratiques agricoles, des carrières et sablières, des stations-service, etc.

Aux îles de la Madeleine, en cas d'intrusion d'eau salée dans un puits de captage municipal, ou encore la contamination de son aire d'alimentation, un autre ouvrage de captage devra être construit pour le remplacer. Compte tenu du caractère unique de la ressource, de la vulnérabilité intrinsèque élevée de l'eau souterraine estimée par la méthode DRASTIC (Section 8.6) et les nombreuses pressions exercées par les activités humaines (Section 6.2), l'ensemble des ressources en eau souterraine devraient être protégées afin d'assurer l'accès à la ressource en cas de besoin et pour en préserver l'intégrité pour les générations futures. Ainsi, ce ne sont pas les sources d'eau potable (ou prélèvements municipaux) qui devraient faire l'objet de mesures de protection, mais l'ensemble des ressources en eau souterraine susceptibles d'être exploitées. Les portions du territoire où l'eau souterraine est exploitée ou exploitable a été cartographiées et correspondent aux aires d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé (Section 9.1.3). Ces territoires pourraient servir pour l'encadrement des activités humaines potentiellement polluantes, dont l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures.

L'analyse de vulnérabilité réalisée pour les sources d'eau potable devrait être étendue aux aires d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. Les risques associés aux activités anthropiques et les événements potentiels devraient être évalués sur ces territoires élargis. L'évaluation des impacts des activités humaines est d'ailleurs une des trois préoccupations prioritaires identifiées par les acteurs de l'eau (Section 6). Les activités et événements devraient être plus nombreux que ceux inventoriés seulement dans les aires d'alimentation des puits municipaux.

Ces analyses de vulnérabilité ne constituent que le point initial de l'approche de protection de l'eau potable adoptée par le gouvernement provincial. Les cinq grandes étapes de la Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable, qui visent à assurer pour l'ensemble de la population un approvisionnement en eau potable de qualité et en quantité suffisante (Gouvernement du Québec, 2012), se déclinent ainsi :

1. Connaître l'état des sources d'eau potable;
2. Analyser leur vulnérabilité;
3. Établir des plans de protection des sources;
4. Mettre en œuvre ces plans;
5. Faire le suivi de ces plans.

Les exigences du Règlement sur le prélèvement des eaux souterraines et leur protection (Q-2, r. 35.2) concernent les deux premières étapes de cette stratégie. Les potentiels de risque pour chacune des activités anthropiques, obtenus lors de l'analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable, devront être classés selon leur importance relative afin d'établir des priorités d'action lors de l'élaboration d'un futur plan de protection et de conservation des sources. Un futur plan de mesure d'urgence visant la protection de la source pourra également être élaboré à partir des potentiels de risque obtenus pour chacun des événements potentiels. Le gouvernement a récemment lancé un programme pour soutenir l'élaboration des plans de protection des sources d'eau potable par les municipalités (MELCC, 2022c). Bien que l'adhésion des municipalités soit facultative, la mise en œuvre d'un tel plan pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine est fortement recommandée, car il contribuerait notamment à :

- Conserver une filière de traitement minimale et les faibles coûts associés;
- Éviter la contamination de puits qui peut s'avérer irréversible et nécessiter l'aménagement de nouveaux puits;
- Continuer à bénéficier d'un suivi allégé de certains paramètres organiques en vertu du RQEP;
- Éviter les investigations coûteuses des sources de contamination lorsqu'une contamination serait identifiée par les suivis de la qualité de l'eau;
- Assurer une eau potable saine pour la santé des consommateurs.

Selon le MELCC (2021b), le plan de protection doit inclure :

- La compilation des menaces locales et régionales recensées dans le rapport d'analyse de vulnérabilité, par ordre de priorité;
- L'identification d'objectifs de protection;
- L'identification des mesures de protection existantes et l'évaluation de leur efficacité;
- L'élaboration des mesures visant à atténuer les impacts des menaces locales ou régionales et précisant le ou les responsables de leur mise en œuvre;
- Un plan de mise en œuvre des mesures de protection, incluant les objectifs de protection, la description des mesures de protection, leur ordre de priorité, les indicateurs de suivi des mesures, un échéancier de réalisation et les renseignements sur les intervenants et les partenaires;
- Une stratégie de diffusion du plan de protection et de ses mesures;
- L'établissement d'un processus d'amélioration continue (suivi, évaluation et mise à jour du plan de protection).

Comme pour l'analyse de vulnérabilité à l'échelle des aires d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, le plan de protection devrait viser l'ensemble de la ressource exploitable des îles de la Madeleine plutôt qu'uniquement les sources d'eau potable. De plus, il pourrait viser non seulement la protection de la ressource, mais aussi sa saine gestion, ce qui inclut tous les

usages de l'eau sur le territoire. Ainsi, il devrait être élaboré, et ses priorités d'action déterminées, en concertation avec les acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau, incluant aussi les usagers du territoire. Le plan de protection des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine devrait s'inscrire dans un processus évolutif et itératif, qui nécessite une révision périodique et sur le long terme des problématiques, des mesures mises en place et leurs objectifs. Comme le Règlement sur le prélèvement des eaux souterraines et leur protection (Q-2, r. 35.2) exige une mise à jour de l'analyse de vulnérabilité des sources aux cinq ans, la révision du plan de protection pourrait être assurée à la même fréquence. Ce suivi permettrait de déterminer si la mise en œuvre du plan est fonctionnelle et s'il protège adéquatement la quantité et la qualité de l'eau.

De multiples mesures de gestion peuvent être introduites dans le plan de protection afin de mitiger les risques. Les listes non exhaustives qui suivent sont inspirées d'outils de gestion proposés par le Conseil canadien des ministres de l'environnement et les gouvernements du Québec, de l'Ontario et de la Nouvelle-Écosse (CCME, 2004; Gouvernement du Québec, 2012; OPNRR & CNS, 2016; Gouvernement de la Nouvelle-Écosse, 2009). La Communauté maritime Les-Îles-de-la-Madeleine et ses municipalités, qui pourraient être appelées à coordonner le plan de protection de la ressource, pourraient disposer des outils réglementaires suivants :

- Les interdictions (ex. : certains contaminants ou utilisations du sol);
- Les permis de construction (avec des critères précis pour la protection de l'eau souterraine);
- L'octroi de permis spéciaux pour réglementer certaines utilisations du sol à risque;
- L'adoption de normes de rendement pour régir les activités de développement;
- La limitation du lotissement (nombre ou taille des lots);
- La vérification et la correction des installations septiques.

De nombreux autres outils non réglementaires, en collaboration avec les autres acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine, pourraient aussi être disponibles, dont :

- L'acquisition de terres ou l'expropriation;
- La planification de l'utilisation du territoire;
- La désignation d'aires de protection;
- L'adoption des meilleures pratiques de gestion pour :
  - o Les sels et abrasifs de voirie;
  - o Les nutriments en milieu agricole;
  - o L'exploitation forestière en territoire privé;
  - o L'efficacité des installations septiques autonomes;
  - o La sécurité des réservoirs d'hydrocarbures domestiques;
  - o Le contrôle des pesticides domestiques;
  - o La collecte de déchets dangereux.
- L'inspection des conduites d'eaux usées;
- Le raccordement des installations septiques autonomes à l'égout municipal;
- La sensibilisation du public;
- Le développement de politiques environnementales des entreprises;
- L'installation de pancartes à l'entrée des aires de protection vulnérables.

En résumé, il ne s'agit pas simplement d'interdire toute activité humaine dans les aires de protection de la ressource, ce qui serait impensable compte tenu de l'importance des territoires concernés. Il s'agit plutôt d'établir des objectifs ciblés et coordonnés avec les différents acteurs du territoire, de mettre en œuvre des mesures appropriées à chacun des buts visés, et d'assurer leur suivi périodiquement pour en évaluer l'efficacité.

### **9.2.7 Transfert de connaissances**

L'hydrogéologie est un domaine d'étude complexe nécessitant une expertise pointue. Il peut être difficile pour un non spécialiste de pleinement comprendre les résultats d'études hydrogéologiques et d'en tirer des interprétations adéquates. Ainsi, une stratégie de transfert des connaissances a été mise en œuvre, en collaboration avec le RQES, pour faciliter la prise en compte des connaissances sur l'eau souterraine dans les décisions de gestion et de l'aménagement du territoire.

Un premier atelier d'échange de connaissance, intitulé Découvrir notre projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines et le lien aux enjeux de notre territoire, a été réalisé en début de projet (le 6 juin 2018) avec les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau des îles de la Madeleine, membres du comité de suivi élargi du projet. Les objectifs de cet atelier étaient :

1. Acquérir des notions de base en hydrogéologie pour communiquer avec l'équipe de recherche réalisant le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, ainsi que des hydrogéologues;
2. Présenter les connaissances qui seront générées par l'étude;
3. Identifier les enjeux actuels de protection et de gestion des eaux souterraines du territoire;
4. Identifier les attentes face à l'étude;
5. Identifier les modes de communication désirables et réalistes entre les chercheurs et les acteurs du territoire.

Un deuxième atelier d'échange, titré Se préparer à utiliser les données du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines pour passer à l'action, s'est déroulé en milieu de projet (le 27 mai 2019) avec la plupart des mêmes acteurs du territoire. Les objectifs étaient de :

1. Poursuivre l'acquisition des notions de base en hydrogéologie pour communiquer avec les chercheurs;
2. Connaître où en est le projet et savoir vers où il s'en va;
3. Apprendre à lire les données hydrogéologiques à l'aide de cartes;
4. Évaluer nos actions actuelles pour les enjeux de protection et de gestion des eaux souterraines;
5. Identifier ses capacités à prendre en compte la protection et la gestion des eaux souterraines.

Un atelier de transfert des connaissances final est planifié au terme du projet (juin 2022), dont les détails sont actuellement en développement. Il visera à :

1. Poursuivre l'acquisition des notions de base en hydrogéologie pour communiquer avec les chercheurs;
2. Comprendre le fonctionnement des aquifères des îles de la Madeleine);

3. S'approprier la base de données géospatiales sur les eaux souterraines;
4. Apprendre à lire et à interpréter les résultats du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* pour répondre à des enjeux de protection et de gestion de l'eau souterraine;
5. Développer des pistes d'action pour la protection et la gestion des eaux souterraines.

Des outils supplémentaires devraient être développés pour que la protection et la gestion de l'eau souterraine soient intégrées de façon permanente dans le cadre de la planification du territoire, par exemple dans les plans directeurs de l'eau ou les schémas d'aménagement et de développement. Dans ce sens, et pour favoriser la sensibilité du public, un atlas vulgarisé présentant le portrait des ressources a été produit. Il inclut les interprétations des résultats les plus significatifs, accompagnés de cartes illustrant ces interprétations sur le territoire.

Les ateliers de transfert des connaissances ne sont donc qu'une première étape et un appui en continu et sur le long terme serait nécessaire pour favoriser l'implantation et le maintien des mesures concrètes de protection et de gestion des eaux souterraines. Des formations en ligne ou des capsules vidéo seraient des exemples d'outils utiles. L'accès à une ressource spécialisée en hydrogéologie, afin de supporter les gestionnaires et orienter leurs interventions portant sur les eaux souterraines, de même que de participer à l'élaboration, la mise en place et le suivi du plan de protection et de gestion de la ressource, seraient des prérequis pour garantir une bonne gouvernance de l'eau aux îles de la Madeleine.

### **9.2.8 Pérennité du portrait de la ressource**

Afin d'assurer la pérennité des documents produits dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, ils devraient être disponibles facilement et libre d'accès pour tous depuis un lieu d'archives numériques. Un identifiant numérique d'objet (DOI – *Digital object identifier*) devrait leur être associé afin d'en faciliter la gestion numérique sur le long terme. Le présent rapport scientifique, incluant ses annexes cartographiques électroniques, et l'atlas vulgarisé sont disponibles depuis le dépôt institutionnel de l'Université Laval Corpus<sup>UL</sup>. Le guide Développement et utilisation des modèles numériques, les fichiers de modélisation et les données brutes des travaux de géophysique réalisés dans le cadre de cette étude sont accessibles sur la plateforme Dataverse de l'Université Laval. Les données géomatiques pourront sous peu être visualisées sous forme de carte interactive ou téléchargées pour utilisation dans un SIG depuis le site Données Québec du Gouvernement du Québec. Les données de la base de données hydrogéologiques y seront disponibles en format ponctuel et celles des cartes du portrait hydrogéologique en format vectoriel ou matriciel. Les DOI et les liens internet pour accéder à l'ensemble de ces documents sont fournis à la page liminaire Accessibilité des documents.

Le maintien du comité de suivi du projet serait d'intérêt pour veiller à ce que les connaissances sur les eaux souterraines soient intégrées aux différents projets de développement du territoire. Ce comité de l'eau pourrait, tout en assurant la formation nécessaire de ses membres, prendre en charge les suivis futurs sur les questions reliés aux ressources en eau, dont les échanges avec la ressource spécialisée recommandée à la Section 9.2.7, et assurer l'accès et la mise à jour des connaissances et des bases de données produites dans le cadre de cette étude. Il pourrait aussi assurer les adaptations nécessaires des résultats fournis par cette étude pour qu'ils puissent répondre à des besoins spécifiques additionnels ou nouveaux. Il pourrait enfin commander des mises à jour de certaines interprétations hydrogéologiques

réalisées dans le cadre du portrait, dont de nouvelles modélisations numériques, pour que la connaissance acquise demeure pérenne et utile pour la protection et la gestion des ressources en eau souterraine de l'archipel.

## 10 CONCLUSION

L'eau souterraine est l'unique source d'eau potable des îles de la Madeleine. Les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau de l'archipel ont désigné l'exploitation durable de la ressource et la pérennité des réseaux de pompage municipaux comme des préoccupations prioritaires relativement à la protection et la gestion de la ressource. Ces préoccupations sont directement concernées par le risque d'intrusion d'eau salée, qui constitue donc une des pressions principales exercées sur la ressource. Une exploitation non durable de la ressource pourrait avoir pour effet de contaminer les puits par de l'eau salée, qui deviendraient alors inutilisables.

Les changements climatiques constituent une autre pression principale sur la ressource et concernent les deux préoccupations prioritaires ci-dessus. Ils devraient avoir pour conséquence de réduire la disponibilité de la ressource, tel qu'attendu par une diminution de la recharge et une hausse relative du niveau marin. L'élévation de la nappe serait alors abaissée, provoquant une remontée de l'interface eau douce – eau salée, et réduisant le volume de la lentille d'eau douce. Le risque de la salinisation des puits serait par la même occasion augmenté.

Une autre préoccupation prioritaire identifiée par les acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau concerne l'évaluation de l'impact des activités humaines. La vulnérabilité élevée de la ressource face à une contamination pouvant provenir de la surface accroît l'importance d'investiguer les effets que pourraient avoir ces activités sur la qualité et la quantité des eaux souterraines. Les activités humaines menaçantes pratiquées sur le territoire sont nombreuses, et comprennent le transport et l'entreposage des hydrocarbures, la gestion des eaux usées et des matières résiduelles, l'utilisation des sels de voirie, l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles (incluant les hydrocarbures), l'agriculture, les cimetières, les activités aéroportuaires et plusieurs autres activités commerciales et industrielles.

Ces pressions exercées sur la ressource et ces préoccupations identifiées par le milieu contribuent grandement à l'importance d'assurer une exploitation durable de la ressource. Les mesures de protection et de gestion à mettre en place doivent être fondées sur un portrait complet des connaissances en eau souterraine. Ce cadre de connaissance de base doit aussi servir à la réalisation de l'analyse de vulnérabilité des sources d'eau potable municipales exigée par la réglementation québécoise. La présente étude réalise ce *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* en recensant d'abord l'ensemble des connaissances existantes sur les eaux souterraines du territoire d'étude. Des données complémentaires de terrain ont ensuite été acquises. L'ensemble des informations récoltées ont enfin été intégrées et interprétées en format cartographique, principalement à l'aide d'une approche méthodologique basée sur la modélisation numérique des écoulements.

Les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, composés principalement de grès, ont été identifiés. Ceux-ci contiennent la presque totalité de l'eau souterraine qui est actuellement exploitée et constituent la réserve principale en eau douce disponible pour les besoins futurs. Cette eau est de très bonne qualité et peut souvent être distribuée sans traitement particulier. Les aires d'alimentation de ces aquifères correspondent aux territoires qui devraient être ciblés par les mesures de protection et de gestion de la ressource. La consommation annuelle en eau douce est très faible comparativement à la réalimentation annuelle des aquifères ci-dessus, et pratiquement négligeable considérant les volumes d'eau disponibles. Ainsi, la quantité d'eau contenue dans les aquifères suffit largement aux besoins en

eau potable actuels. La pérennité des taux de prélèvement semble aussi assurée selon les projections en 2050 de la hausse de la consommation et de la diminution du volume d'eau disponible causée par les changements climatiques.

En évaluant de manière plus spécifique les réseaux de puits municipaux en place, les réseaux de distribution en eau potable des îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons pourraient exploiter des volumes d'eau plus importants, sans causer la salinisation des puits. Les réseaux des îles du Havre Aubert et de la Grande Entrée disposent d'une plus faible marge de manœuvre et des puits additionnels seraient nécessaires pour en accroître les débits de pompage. Il faut considérer que ces évaluations considèrent que l'état d'équilibre du positionnement de l'interface eau douce – eau salée sous les puits d'alimentation municipaux est atteint, ce qui n'est pas le cas pour tous les puits. Les remontées de l'interface s'étendent sur plusieurs décennies, et même plusieurs siècles pour les puits de l'île du Havre Aubert. Les débits de pompage de certains puits sur les îles du Cap aux Meules et de la Grande Entrée pourraient causer leur salinisation à moyen terme. Certains autres puits sont aussi vulnérables à l'intrusion d'eau salée et disposent d'une faible marge entre leur débit actuel et le débit maximal qu'il est possible d'exploiter sans les contaminer. Les changements climatiques attendus en 2050 devraient très légèrement diminuer la quantité d'eau additionnelle disponible pour les réseaux de distribution, à l'exception de celui de l'île du Havre Aubert, qui devrait voir sa quantité d'eau additionnelle exploitable par le réseau de puits en place diminuer de façon plus marquée.

Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'alimentation en eau potable, que les aquifères sont de vulnérabilité élevée, et qu'il existe de nombreuses activités humaines pouvant affecter la ressource, il est recommandé de protéger l'ensemble des ressources en eau souterraine. Ainsi l'analyse de vulnérabilité, de même que l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi d'un plan de protection et de gestion, devraient être étendus à l'échelle des aires d'alimentation des aquifères au potentiel moyen à très élevé.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- ADS associés Ltée (1989). *Étude hydrogéologique : Aménagement d'un puits d'alimentation, Île d'Entrée*. Montréal (Qc), ADS associés Ltée, Rapport produit pour Hydro-Québec., 15 p. et annexes.
- Agglomération des Îles-de-la-Madeleine (2010). *Schéma d'Aménagement et de développement révisé*. Adopté à la séance du conseil d'agglomération des Îles-de-la-Madeleine le 11 mai 2010 par le règlement A-2010-07.
- Agrométéo Québec (2021). *Atlas agroclimatique du Québec*. [En ligne]. <https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/map/moyenne2/saisicris/1979-2008/false> (page consultée le 14 juin 2021).
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. et Petty, R. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Rapport no EPA-600/2-87-035. Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, 622 p. [En ligne]. <http://rdn.bc.ca/cms/wpattachments/wpID3175atID5999.pdf> (page consultée le 26 janvier 2022).
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Second ed. London, UK: Academic Press.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B. et Neitsch, S. L. (2011). *Soil and water assessment tool, Input/output file documentation, version 2009*. Texas Water Resources Institute, Technical Report no.365, Texas A&M University System, College Station, Texas 77843-2118, Septembre 2011.
- Arrakis (2019). *Diagnostics de puits*. Québec, Qc, Arrakis consultants inc. n°A0807-01A. Rapport produit pour la municipalité Les Îles-de-la-Madeleine. 22 p. et annexes.
- Arrakis (2021). *Diagnostics de puits*. Québec, Qc, Arrakis consultants inc., n°A0807-02A. Rapport produit pour la municipalité Les Îles-de-la-Madeleine. 40 p. et annexes.
- ASCE/WEF (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. American Society of Civil Engineers et Water Environment Federation, New York, 724 p.
- Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D. et Dausman, A.M. (2013). *Documentation of the seawater intrusion (SWI2) package for MODFLOW*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book, 6 p.
- Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Bleser, J., Beaudin, I. et Rivard, C. (2012). *Protocole pour la préparation du livrable 26 – Utilisation de l'eau, Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec*. Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement en collaboration avec la Commission géologique du Canada, l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement et l'organisme de bassin versant de la Yamaska. Version préliminaire du 19 avril 2012. 10 p. et annexes.
- BAPE (2006). *Projet d'établissement d'un lieu d'enfouissement technique aux Îles-de-la-Madeleine*. Rapport d'enquête et audience publique du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement.

- Rapport 225. [En ligne]. <https://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/etablissement-un-lieu-enfouissement-technique-iles-de-la-madeleine/> (page consultée le 8 décembre 2021).
- BAPE (2013). *Les effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et l'exploitation gazière*. Rapport d'enquête et audience publique du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. Rapport 297 et la documentation déposée. [En ligne]. [https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes\\_phreatiques\\_%C3%AEiles-de-la-madeleine/index.htm](https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes_phreatiques_%C3%AEiles-de-la-madeleine/index.htm) (page consultée le 8 décembre 2021).
- Barnett, R.L., Bernatchez, B., Garneau, M. et Juneau, M.-N. (2017). *Reconstructing late Holocene relative sea-level changes at the Magdalen Islands (Gulf of St. Lawrence, Canada) using multi-proxy analyses*. Journal of Quaternary Science, ISSN 0267-8179. DOI: [10.1002/jqs.2931](https://doi.org/10.1002/jqs.2931).
- Benoit, N., Rivard, C., Carrier, M.-A. et Lefebvre, R. (2012). *Protocole pour la préparation des livrables 15 – Estimation de l'épaisseur des formations superficielles et 16 – Topographie du roc, Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec*. Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement en collaboration avec la Commission géologique du Canada. Version préliminaire du 20 avril 2012. 7 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A., (2008). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.
- Biogénie inc. (1993). *Étude de caractérisation de l'aire d'entraînement des pompiers et de ses environs à l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine sur le chemin de l'aéroport*. Québec (Qc), n°409. Rapport produit pour Transports Canada. 17 p. et annexes.
- Biogénie inc. (2015). *Évaluation environnementale de site Phase II - Ancien dépôt pétrolier Esso n°44-0203/88000389*. 28 p. et annexes, n°ES4240. Rapport produit pour Transports Canada.
- Bohling, G.C. et Butler Jr., J.J. (2001). *Ir2dinv: a finite-difference model for inverse analysis of two-dimensional linear or radial groundwater flow*. Computers and Geosciences 27 (10), pp. 1147–1156.
- Bordeleau, G., Blais, V. et Nadeau, V. (2008), *Contamination des eaux souterraines par les lixiviats de cimetières*. Capsules INRSciences, No. 1, mars 2008. [En ligne]. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/6847/1/2008-01.pdf> (page consultée le 10 décembre 2021).
- Borden, R. (2006). *Protocol for Enhanced In Situ Bioremediation Using Emulsified Edible Oil*. Department of Defense of the United States of America, Environmental Security Technology Certification Program. Prepared by Solutions-IES. 85 p.
- Bourque, P.-A. (2010). Planète Terre. [En ligne]. [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html) (page consultée le 1 février 2022).

- BPR (2003). *Analyse des questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture, Programme national d'approvisionnement en eau, Province de Québec*. Rapport final, BPR Groupe-Conseil. Préparé pour Agriculture et Agroalimentaire Canada, Bureau de l'environnement, Direction générale des politiques stratégiques. 68 p. et annexes.
- BPR (2011). *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine : Révision du plan directeur de gestion de l'eau potable*. Charny (Qc), BPR-Infrastructure inc., n°Q571-08-02, 47 p. et annexes.
- Brière, F.G. (2000). *Distribution et collecte des eaux*. Presses internationales Polytechnique, deuxième édition.
- Brisebois, D. (1972). *Géologie de l'Archipel des Îles-de-la-Madeleine (Rapport préliminaire)*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, n°DP-103, 7 p.
- 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. 48 p.
- Bureau, M. (1995). *Localisation des interfaces eau douce - eau saumâtre - eau salée par méthodes géophysiques aux puits de captage VIGNEAU de Havre-Aubert*. Rapport produit pour la municipalité de Havre-Aubert. 6 p. et annexes.
- Butler Jr, J. J. (1998). *The design, performance, and analysis of slug tests*. Crc Press.
- Canadell J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. et Schulze, E.-D. (1996). *Maximum rooting depth of vegetation types at the globe scale*. *Oecologia* 108 (4), pp. 583-595.
- CCME (2004). *De la source au robinet : guide d'application de l'approche à barrières multiples pour une eau potable saine*. Conseil canadien des ministres de l'environnement. 274 p. [En ligne]. [http://www.ccme.ca/files/Resources/fr\\_water/fr\\_source\\_to\\_tap/mba\\_guidance\\_doc\\_f.pdf](http://www.ccme.ca/files/Resources/fr_water/fr_source_to_tap/mba_guidance_doc_f.pdf) (page consultée le 18 janvier 2021).
- Chaillou, G., Touchette, M., Rémillard, A.M., Buffin-Bélangier, T., St-Louis, R., Héту, B. et Tita, G. (2012). *Synthèse de l'état des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine – Impacts de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles sur celles-ci*. Université du Québec à Rimouski, Département de biologie, chimie et géographie, Synthèse remise au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la faune et des Parcs (MDDEFP) et au ministère des Ressources naturelles (MRN), Décembre 2012, 200 p. [En ligne]. [https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes\\_phreatiques\\_%C3%AEles-de-la-madeleine/documents/PR3.pdf](https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes_phreatiques_%C3%AEles-de-la-madeleine/documents/PR3.pdf) (page consultée le 10 décembre 2021).
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*. Édition 2016. Ouranos, 94 p.
- Chouteau, M. et Intissar, R. (2010). *Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase I)*. Montréal (Qc), École polytechnique de Montréal, 68 p. et annexes.

- Chouteau, M., Abderrezak B. et Abdelhamid M. (2011). *Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase II)*. Montréal (Qc), École polytechnique de Montréal, 96 p. et annexes.
- Chouteau, M. et Bouchedda, A. (2014). *Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase III)*. Montréal (Qc), École polytechnique de Montréal, 72 p. et annexes.
- Church J.A. et White N.J. (2011). *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century*. *Surveys in Geophysics* 32, pp. 585–602.
- Compagnie Internationale des Eaux Ltée. (1969). *Rapport Approvisionnement en eau - Ministère des travaux publics - Havre-Aubert*. Montréal, Qc, 6 p. et annexes.
- Compagnie Internationale des Eaux Ltée. (1974). *Programme de développement de nappes d'eau souterraines à Lavernière, Étang-du-Nord, Fatima (8 piézomètres et 3 puits exploratoires)*. G4165-01-01-01015.
- Compagnie Internationale des Eaux Ltée. (1975). *Rapport sur l'expertise de forage et de pompage aux Îles-de-la-Madeleine pour les municipalités de Fatima et de l'Étang-du-Nord*. n°1-1-01-1338-40, 4 p. et annexes.
- Comte, J.-C. (2008). *Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers : Application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal)*. Thèse (PH.D.) en sciences de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 186 p. et annexes.
- Consultants H.G.E. Inc. (1987). *Étude hydrogéologique, Îles-de-la-Madeleine, Municipalité du Havre-aux-Maisons*. n° projet HGE-87-252-1, 17 p. et annexes.
- Coulon, C., Pryet, A., Lemieux, J. M., Yrro, B. J. F., Bouchedda, A., Gloaguen, E., Comte, J.-C., Dupuis, J. C. et Banton, O. (2021). *A framework for parameter estimation using sharp-interface seawater intrusion models*. *Journal of Hydrology*, 600, 126509.
- Coulon, C., Lemieux, J. M., Pryet, A., Bayer, P., Young, N. L. et Molson, J. (2022). *Pumping optimization under uncertainty in an island freshwater lens using a sharp-interface seawater intrusion model*. *Water Resources Research* (en révision).
- Croff, A.G., Lomenick, T.F., Lowrie, R.S. et Stow, S.H. (1985). *Evaluation of five sedimentary rocks other than salt for high level waste repository siting purposes: Oak Ridge*. Oak Ridge National Laboratory ORNL/CF-85/2/V2.
- Croteau, A. (2006). *Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge de l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Chateauguay, Québec et États-Unis*. Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Québec, Université du Québec.
- Croteau F., Coulon C., Lemieux J.-M., et Molson J. (2021). *Impact of long well screens on monitoring of the freshwater-saltwater transition zone in coastal aquifers*. *GeoNiagara 2021*, 74th Canadian

- Geotechnical Conference and the 14th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Niagara Falls, Canada.
- CSdesiles (2021). *Commission scolaire des îles*. [En ligne]. <http://www.csdesiles.qc.ca/> (page consultée le 20 septembre 2021).
- Daigle, R.J. (2012). *Sea-Level Rise and Flooding Estimates for New Brunswick Coastal Sections*. Report prepared by R.J. Daigle Enviro for the Atlantic Climate Adaptation Solutions Association, 27 p. et annexes. [En ligne]. <https://atlanticadaptation.ca/en/islandora/object/acasa%3A569> (page consultée le 24 novembre 2021).
- Dausman, A. M., Langevin, C., Bakker, M., et Schaars, F. (2010). *A comparison between SWI and SEAWAT—the importance of dispersion, inversion and vertical anisotropy*. Proceedings of SWIM, 21, pp. 271-274.
- Davis, S.N. (1969). *Porosity and Permeability in Natural Materials in Flow through Porous Media*. Nigerian Journal of Mining Geology, 26, pp. 279-284.
- de Graaf, I.E.M., Gleeson, T., van Beek, L.P.H. et coll. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. Nature, 574, pp. 90–94. DOI: [10.1038/s41586-019-1594-4](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4).
- Dessureault, R. et Simard, G. (1970). *Hydrogéologie des Îles-de-la-Madeleine*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 46 p. et annexes.
- Devlin, J.F. (2014). *Electronic supplementary material for the article Devlin, J.F. 2015. HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis. Hydrogeology Journal. Dept. of Geology, University of Kansas Developed April 29, 2014, most recent update September, 2016.* [En ligne]. <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/21763> (page consultée le 2 novembre 2021).
- Doherty, J. (2004). *PEST model-independent parameter estimation user manual*. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1993). *Construction et essais de huit puits de production d'eau potable sur l'Île Centrale, Îles-de-la-Madeleine*. Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc. Rapport produit pour Les Consultants BPR. 20 p. et annexes.
- Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1995). *Définition de débits sécuritaires au droit des puits de production P1 et P2. Municipalité de Havre-Aubert, Îles-de-la-Madeleine*. Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc. Rapport produit pour Les Consultants BPR. 13 p. et annexes.
- Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc. (1998). *Municipalité de l'île-du-Havre-Aubert : Étude hydrogéologique*. Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc. Rapport produit pour Les Consultants BPR. 30 p. et annexes.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., et Meyzonnat, G. (2021). *Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: Contributions of a water budget approach in southern Quebec*, Hydrol. Earth Syst. Sci. DOI: [10.5194/hess-2021-7](https://doi.org/10.5194/hess-2021-7).
- Dubois, J.-M.M. et Parent, M. (en révision). *Géologie des formations superficielles, Îles de la Madeleine, Québec*. Commission géologique du Canada, carte 1 : 50 000.

- Entraco inc. (2008). *Évaluation environnementale du site Phase 2, Caractérisation des sols et de l'eau souterraine*. Montréal (Qc), n°P0857. Rapport produit pour Transports Canada. 66 p. et annexes.
- Entraco inc. (2014). *Évaluation environnementale de site Phase II*. Greenfield (Qc), n°P0962. Rapport produit pour Transports Canada. 39 p. et annexes.
- Farnham, I. M., Singh, A.K., Stetzenbach, K.J. et Johannesson, K.H. (2002). *Treatment of Nondetects in Multivariate Analysis of Groundwater Geochemistry Data*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 60(1–2): pp. 265-281.
- Fédération des producteurs d'oeufs du Québec (2022). *Ferme avicole Bourgeois Dumont inc.* [En ligne]. <https://oeuf.ca/producteurs/les-fermes/ferme-avicole-bourgeois-dumont-inc/> (page consultée le 6 janvier 2022).
- Fetter C.W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. 598 p.
- Finch, J.W. (1998). *Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model - Sensitivity to land surface parameters*. Journal of Hydrology 211 (1-4), pp. 112-125.
- Food and Agriculture Organisation of the United Nations (1997). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Guidelines for Study, Monitoring and Control*. Water Reports, Vol. 11.
- Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et Ketch, L.A. (2004). *Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence*. Marine Geology, 210 (1–4), pp. 169–204.
- Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S. et Drejza, S. (2014). *Exposition potentielle des infrastructures à l'érosion côtière : développement d'un outil de planification de l'aménagement côtier; Îles-de-la-Madeleine*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juin 2014, 55 p. et annexes cartographiques.
- Freeze, A.R. et Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632. 604 p.
- Gagné, G., Beaudin, I., Leblanc, M., Drouin, A., Veuilleux, G., Sylvain, J.D., et Michaud, A.R. (2013). *Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques*. Rapport final, IRDA, Québec, Canada, 81 p. [En ligne]. <https://irda.blob.core.windows.net/media/2133/gagne-et-al-2013-rapport-classement-sols-mineraux-groupes-hydro.pdf> (page consultée le 14 juin 2021).
- Gelhar, L. W., Welty, C., et Rehfeldt, K. R. (1992). *A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers*. Water resources research, 28(7), pp. 1955-1974.
- Gélinas, P.J. et Choquette, M. (1996). *Essais de caractérisation des grès rouges de Cap aux Meules*. Groupe de Recherche en Environnement et en Géo-Ingénierie, Département de Géologie et de Génie Géologique, Université Laval. Rapport présenté à SOPRIN / ADS. 27 p. et annexes.
- Géophysique GPR (1990a). *Étude géophysique sur les sites des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'île d'Entrée, Volet A : Centrale de Cap-aux-Meules*. Longueuil (Qc), Géophysique GPR international inc., n°projet M90084. Rapport produit pour Hydro-Québec. 22 p. et annexes.

- Géophysique GPR (1990b). *Étude géophysique sur les sites des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'Île d'Entrée, Volet B : Centrale de l'Île d'Entrée*. Longueuil (Qc), Géophysique GPR international inc., n°projet M90084. Rapport produit pour Hydro-Québec. 24 p. et annexes.
- Geoterrex LDT. (1971). *Étude hydrogéologique par sondages électriques des Îles-de-la-Madeleine*. Ottawa (ON), Geoterrex Ltd, n°85-724. Rapport produit pour le ministère des Richesses naturelles du gouvernement du Québec. 39 p. et annexes.
- Geoterrex LDT. (1976). *Étude hydrogéologique complémentaire par sondages électriques des Îles-de-la-Madeleine*. Ottawa (ON), Geoterrex Ltd, n°85-724. Rapport produit pour le ministère des Richesses naturelles du gouvernement du Québec. 37 p. et annexes.
- Germain, A., Tremblay, Y., Lemieux, J.-M., Dupuis, C., Coulon, C. et Adam-Sawyer, L. (2021). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines des Îles de la Madeleine, Rapport d'étape Phase II*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. Janvier 2021. 62 p. et annexes.
- Germain, A., Lemieux, J.-M., Coulon, C., Parenteau-Thibault, M. Croteau, F., Dupuis, C. et Young, N.L. (2022). *Surveillance de l'intrusion d'eau salée et quantification des résurgences d'eau souterraine en milieu marin aux Îles-de-la-Madeleine en contexte de changements climatiques, Rapport Final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, février 2022, 129 p.
- GIEC (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Septembre 2019. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [En ligne]. <https://www.ipcc.ch/srocc/> (page consultée le 18 novembre 2021).
- Gouvernement de la Nouvelle-Écosse (2009). *Developing a Municipal Source Water Protection Plan: A Guide for Water Utilities and Municipalities. Step 4. Develop a Source Water Protection Management Plan*. Prepared by: Nova Scotia Environment, Water and Wastewater Branch, 2004. Reprinted 2009. [En ligne]. <https://novascotia.ca/nse/water/docs/WaterProtectionPlanStep4.pdf> (page consultée le 18 janvier 2021).
- Gouvernement du Québec (2012). *Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable, Document de consultation publique*. 32 p. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/strategie/strategie.pdf> (page consultée le 18 janvier 2021).
- Groupe Madelin'Eau. (2003). *Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine, Un défi de développement durable*. Rapport produit pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 69 p. et annexes.
- Groupe Madelin'Eau. (2004). *Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine, Un défi de développement durable, Rapport final : Document No 1 Méthodologie de l'étude, Document No 2 Île de Cap-aux-Meules, Document No 3 Secteurs hors île de Cap-aux-Meules*. Version révisée et complétée.
- Groupe Madelin'Eau. (2007). *Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines (Q2, R.1.3). Forages FE-06-03, FE-06-04, FE-06-05 et FE-06-06, Secteur sud-*

- est de l'île de Grande-Entrée. n°624. Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 47 p. et annexes.*
- Groupe Madelin'Eau. (2009). *Secteur de Grande-Entrée - Flanc Nord, Alimentation en eau potable : Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines, Puits de production GE-09-01A; GE-09-02; GE-09-03; GE-09-04 et GE-09-05B. n°702. Rapport produit pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 61 p. et annexes.*
- Groupe Madelin'Eau. (2010a). *Secteur de l'Étang-du-Nord (Regroupement N°1), Alimentation en eau potable, Puits EDN-09-01PP; EDN-09-02PP; EDN-09-03PP et EDN-09-04PP. Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES. Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique. n°projet 2009-711. Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 61 p. et annexes.*
- Groupe Madelin'Eau. (2010b). *Secteur de Fatima (Regroupement N°2), Alimentation en eau potable, Puits FAT-09-01PP; FAT-09-02PP; FAT-09-03PP et FAT-09-04PP, Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES, Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique. n° projet 2009-711. Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 68 p. et annexes.*
- Groupe Madelin'Eau. (2010c). *Secteur de Havre-aux-Maisons (Regroupement N°3), Alimentation en eau potable, Puits HAM-09-01PP et HAM-09-02PP, Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES, Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique. n° projet 2009-711. Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 60 p. et annexes.*
- Groupe Madelin'Eau. (2011). *Projet de réalisation d'un forage gazier vertical et conventionnel d'une profondeur de 2 500 mètres – Municipalité des Îles-de-la-Madeleine – Reconnaissance/identification des cibles les plus propices – Rapport d'étape 1 – Expertise hydrogéologique. Septembre 2011, 79 p.*
- Groupe Madelin'Eau. (2012). *Archipel des Îles-de-la-Madeleine. Suivi piézométrique des nappes aquifères. Note technique. Étape 1-Reconnaissance de terrain. n°projet 2012-784. Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. 9 p. et annexes.*
- Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., et Konikow, L. F. (2017). *MODFLOW-2005 version 1.12.00. the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017. DOI: [10.5066/F7RF5S7G](https://www.usgs.gov/software/modflow-2005-usgs-three-dimensional-finite-difference-ground-water-model). [En ligne]. <https://www.usgs.gov/software/modflow-2005-usgs-three-dimensional-finite-difference-ground-water-model> (page consultée le 9 mars 2022).*
- Hargreaves, G.H. et Samani, Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature: Applied Engineering in Agriculture v. 1, no. 2, pp. 96–99*
- Hassaoui, J., Lemieux, J.-M., Molson, J.W., Therrien, R. et Therrien, P. (2014). *Impact des changements climatiques et des prélèvements d'eau sur les ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine. Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval. Rapport remis au ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 137 p. et annexes.*
- Héту, B., Rémillard, A.M., Bernatchez, P. et St-Onge, G. (2020). *Landforms and Landscapes of the Magdalen Islands: The Role of Geology and Climate. World Geomorphological Landscapes, pp.431-451.*

- Hughes, I.G., Hase, T.P.A., (2010). *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. Oxford University Press.
- Hyder, Z., Butler Jr, J. J., McElwee, C. D., et Liu, W. (1994). *Slug tests in partially penetrating wells*. Water Resources Research. 30(11). pp. 2945-2957.
- INSPQ (2015). *L'impact des cimetières sur la qualité microbienne des eaux souterraines*. Résumé scientifique. Institut national de santé publique du Québec. [En ligne]. <https://www.inspq.qc.ca/bise/resume-l-impact-des-cimetieres-sur-la-qualite-microbienne-des-eaux-souterraines> (page consultée le 9 décembre 2021).
- INSPQ (2019). *Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine – Nitrates/Nitrites*. Centre d'expertise et de référence en santé publique. Institut national de santé publique du Québec. [En ligne]. <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/> (page consultée le 12 avril 2021).
- ISQ (2021a). *La migration interrégionale au Québec en 2019-2020 : une année défavorable aux grands centres urbains, surtout Montréal*. Bulletin sociodémographique, Volume 25, numéro 1 – Janvier 2021. [En ligne] <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/migration-interregionale-quebec-2019-2020-annee-defavorable-aux-grands-centres-urbains-surtout-montreal.pdf> (page consultée le 9 décembre 2021).
- ISQ (2021b). *Projections de population - MRC (municipalités régionales de comté), Scénario de référence (A2021)*. Institut de la statistique du Québec, Gouvernement du Québec, Mise à jour le 22 juillet 2021. [En ligne] <https://statistique.quebec.ca/fr/document/projections-de-population-mrc-municipalites-regionales-de-comte> (page consultée le 6 octobre 2021).
- Johnson, A.I. et Morris, D.A. (1962). *Physical and hydrologic properties of water-bearing deposits from core holes in the Los Banos-Kettleman City area, California*. U.S. Geol. Survey open-file report, 182 p.
- Kamps, P., Nienhuis, P., van den Heuvel, D. et de Joode, H. (2016). Monitoring Well Optimization for Surveying the Fresh/Saline Groundwater Interface in the Amsterdam Water Supply Dunes. 24th Salt Water Intrusion Meeting and the 4th Asia-Pacific Coastal Aquifer Management Meeting, 4 –8 July 2016, Cairns, Australia, pp. 96-99.
- Konikow, L.F., Hornberger, G.Z., Halford, K.J., et Hanson, R.T., (2009). *Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A30, 67 p.
- Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée (1993). *Construction de deux puits permanents : Recherche en eau souterraine*. n° 2066-00-01. Rapport produit pour Les Consultants Lapel inc. 17 p. et annexes.
- Labrecque, B. (2006). *Conciliation du niveau marégraphique avec le niveau géodésique*. Communication courriel [En ligne]. <https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/LET-madeleine/documents/DB26.pdf> (page consultée le 17 février 2022).
- Lachance, M., Verreault, G., Coté, L., Harvey, B.-P., Bertrand, P., Vigneault, Y., Désilets, L., Crispin, M. et Tremblay, R. (1993). *Développement de cartes thématiques aux Îles-de-la-Madeleine: Cartographie de systèmes côtiers et élaboration du système de gestion de base des données*. Québec, INRS-Eau, n°368, 93 p. et annexes.

- Lambert, M., Walter, J., Rouleau, A. et Daigneault, R. (2010). *Protocole de fiabilité et validation des données de forage, Version 02, Projet interrégional sur les eaux souterraines*. Université du Québec à Chicoutimi. Version préliminaire du 10 janvier 2010. 24 p.
- La Presse (2021). *Voie maritime du Saint-Laurent : quatre chiffres pour comprendre*. Nouvelle parue le 12 octobre 2021. [En ligne]. <https://www.lapresse.ca/affaires/portfolio/2021-10-12/transport-maritime/voie-maritime-du-saint-laurent-quatre-chiffres-pour-comprendre.php> (page consultée le 20 janvier 2022).
- Larocque, M., Meyzonnat, G., Ouellet, M. A., Graveline, M. H., Gagné, S., Barnetche, D. et Dorner, S. (2015a). *Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil-Soulanges - Rapport scientifique*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. 201 p.
- Larocque, M., Gagné, S., Barnetche, D., Meyzonnat, G., Graveline, M. H. et Ouellet, M. A. (2015b). *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 258 p.
- Lavoie, D., Pinet, N., Dietrich, J., Hannigan, P., Castonguay, S., Hamblin, A.P., et Giles, P. (2009). *Petroleum resource assessment, Paleozoic successions of the St. Lawrence Platform and Appalachians of eastern Canada*. Geological Survey of Canada, Open File 6174, 273 p.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., et Saindon, L. (1983). *Precipitation-runoff modeling system: User's manual*. Water-resources investigations report, 1983, vol. 83, no 4238, pp. 207.
- Leblanc, Y. (1994). *Analyse et modélisation numérique de huit puits de production sur L'Île du Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine*. Québec (Qc), Essai de maîtrise (M.Sc.) à l'Université Laval, 112 p. et annexes.
- Leblanc, Y., Légaré, G., Lacasse, K., Parent, M. et Campeau, S. (2013). *Caractérisation hydrogéologique du sud-ouest de la Mauricie*. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Département des sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 134 p., 15 annexes et 30 documents cartographiques (1:100 000).
- Le Devoir (2013). *12 000 litres de diesel utilisés pour forer les Îles-de-la-Madeleine*. Article écrit par Alexandre Shields, Nouvelle parue le 21 août 2013. [En ligne]. <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/385627/12-000-litres-de-diesel-utilises-pour-forer-les-iles-de-la-madeleine> (page consultée le 9 décembre 2021).
- Lefebvre, R., Carrier, M.-A., Tremblay, L., Gagné, S., Benoit, N. et Rivard, C. (2012.) *Protocole pour la préparation du Livrable 19 et 20 – Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc*. Institut national de la recherche scientifique, Centre – Eau Terre Environnement (INRS-ETE) et l'Université du Québec à Montréal (UQAM), en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC). Version préliminaire du 31 mars 2012. 7 p.

- Lemieux, J.-M., Sudicky, E.A, Peltier, W.R, et Tarasov, L. (2008). *Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 113, F01011. DOI :[10.1029/2007JF000838](https://doi.org/10.1029/2007JF000838)
- Lemieux, J.-M., Hassaoui, J., Molson, J.W., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M. et Ouellet, M. (2015). *Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands*. Québec, Canada. Journal of Hydrology: Regional Studies, 3, pp. 400-423.
- Lemieux, J.-M., Dupuis, C., Chouteau, M. et Cochand, M. (2017). *Déploiement du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec aux Îles de la Madeleine*. Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec. Rapport remis au ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 72 p. et annexes.
- Lemieux, J.-M., Dupuis, C., Tranquille Temgoua, A. G., Tremblay, Y. et Germain, A. (2019). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines des Îles de la Madeleine. Rapport d'étape de la Phase I*. Université Laval, 102 p. et annexes.
- Lide, D.R. (Ed.). (1997). *CRC handbook of chemistry and physics*. 78th edition. CRC press.
- Marcil, J. S. (2021). *La surpenante histoire de l'exploration pétrolière au Québec*. Ressources Énergies et Industrie. Volume 1, numéro 2, pp. 41-49.
- MAMH (2021). *Grandes affectations du territoire*. Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. [En ligne]. <https://www.mamh.gouv.qc.ca/amenagement-du-territoire/guide-la-prise-de-decision-en-urbanisme/planification/grandes-affectations-du-territoire/> (page consultée le 4 octobre 2021).
- Martel, R., Calderhead, A., Tranquille, A.-G., Deschênes-Rancourt, C., Ballard, J.-M. et Lévesque, R. (2015). *Caractérisation hydrogéologique dans le cadre du suivi de la qualité des eaux souterraines au site de l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules*. Québec (Qc), INRS-ETE, n°R1648, 68 p. et annexes.
- Martel, R., Calderhead, A., Paradis, D., Ahad, J., Gosselin, J.-S. et Deschênes-Rancourt, C. (2017). *Caractérisation hydrogéologique complémentaire dans le cadre du suivi de la qualité des eaux souterraines au site de l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules*. Québec, INRS-ETE, n°R-1728, 72 p. et annexes.
- MDDEFP (2012). *Guide de gestion des eaux pluviales du Québec*. Ministère de développement durable de l'environnement de la faune et des parcs, Gouvernement du Québec. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf> (page consultée le 14 juin 2021).
- MELCC (2012). *Climat du Québec, Classification de Köppen-Geiger, Basée sur les normales 1981-2010*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/cartes/Classification-Koppen.pdf> (page consultée le 5 octobre 2021).
- MELCC (2015). *Guide de conception des installations de production d'eau potable*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/> (page consultée le 20 mai 2021).

- MELCC (2018). *Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 189 p. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/prelevements/guide-analyse-vulnerabilite-des-sources.pdf> (page consultée le 1<sup>er</sup> février 2021).
- MELCC (2019). *Détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC – Guide technique*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 86 p. [En ligne]. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/drastic/guide.pdf> (page consultée le 14 juin 2021).
- MELCC (2021a). *Registre des aires protégées*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. [En ligne]. [https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/aires\\_protegees/registre/index.htm](https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/registre/index.htm) (page consultée le 7 octobre 2021).
- MELCC (2021b). *Programme pour l'élaboration des plans de protection des sources d'eau potable. Cadre normatif*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. 20 p. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/peppsep/cadre-normatif.pdf> (page consultée le 9 mars 2022).
- MELCC (2022a). *Programmes d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines* [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm> (page consultée le 4 mars 2022).
- MELCC (2022b). *La qualité de l'eau de mon puits*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm> (page consultée le 4 mars 2022).
- MELCC (2022c). *Programme pour l'élaboration des plans de protection des sources d'eau potable (PEPPSEP)*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/peppsep/index.htm> (page consultée le 9 mars 2022).
- Mercier-Rémillard, A. (2016). *Histoire glaciaire et variations du niveau marin relatif aux Îles-de-la-Madeleine*. Thèse, Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, 247 p.
- Mercier-Rémillard, A., St-Onge, G., Bernatchez, P., Héту, B., Buylaert, J.-P., Murray, A.S. et Vigneault, B. (2016). *Chronology and stratigraphy of the Magdalen Islands archipelago from the last glaciation to the early Holocene: new insights into the glacial and sea-level history of eastern Canada*. *Boreas*, 45(4): 604-628. DOI: [10.1111/bor.12179](https://doi.org/10.1111/bor.12179).
- Mercier-Rémillard, A., St-Onge, G., Bernatchez, P., Héту, B., Buylaert, J. P., Murray, A. S., et Lajeunesse, P. (2017). *Relative sea-level changes and glacio-isostatic adjustment on the Magdalen Islands*

- archipelago (Atlantic Canada) from MIS 5 to the late Holocene*. *Quaternary Science Reviews*, 171, pp. 216-233.
- MFFP (2018). *Cartographie du 5e inventaire écoforestier du Québec méridional — Méthodes et données associées*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. 111 p. [En ligne]. <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/publications-inventaire-forestier.jsp> (page consultée le 14 juin 2021).
- MFFP (2021). *Classification écologique du territoire québécois*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers, Gouvernement du Québec. 11 p.
- Nienhuis, P., Kamps, P., Spillekom, S. et Olsthoorn, T. (2010). Comparing methods for exploring the fresh/salt groundwater interface position in the Amsterdam water supply dunes. SWIM21 - 21st Salt Water Intrusion Meeting, June 21 - 26, 2010, Azores, Portugal, pp. 191-194.
- Mines Seleine (2013). *Présentation du 15 mai 2013 sur les effets liés à l'exploration et à l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux îles de la Madeleine*, 26 pages. [En ligne]. [https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes\\_phreatiques\\_%C3%AEles-de-la-madeleine/documents/DB15.pdf](https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/nappes_phreatiques_%C3%AEles-de-la-madeleine/documents/DB15.pdf) (page consultée le 1<sup>er</sup> décembre 2021).
- Ministère de l'Environnement (2004). *Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé*. Caractérisation de l'eau souterraine dans les sept bassins versants. Gouvernement du Québec, 67 p.
- Morris D.A. et Johnson, A.I. (1967). *Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey*. Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D. 42 p.
- MTQ (1995). *Manuel de conception des ponceaux*, Service de l'hydraulique, Gouvernement du Québec.
- Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (2016). *Installations septiques individuelles, Inventaire 2015-2016*. Rapport final. Préparé par le Service de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme, 15 p.
- Oakley, B.A. et Boothroyd, J.C. (2012). *Reconstructed topography of Southern New England prior to isostatic rebound with implications of total isostatic depression and relative sea level*. *Quaternary Research* 78, pp. 110–118.
- OPNRR & CNS (2016). *Plan de protection des sources. Région de protection des sources de Raisin-Nation Sud*. September 1, 2016. Version 1.4.0. Office de protection de la nature de la région Raisin & Conservation de la Nation Sud. [En ligne]. <https://yourdrinkingwater.ca/files/source-protection-plan/Plan-1-4-0-Complete.pdf> (page consultée le 18 janvier 2021).
- Paradis, D., Vigneault, H., Lefebvre, R., Savard, M.M., Ballard, J.-M. et Qian, B. (2016). *Groundwater nitrate concentration evolution under climate change and agricultural adaptation scenarios: Prince Edward Island, Canada*. *Earth System Dynamics*, 7, pp. 183-202.
- Person, M., McIntosh, J., Bense, V., et Remenda, V. H. (2007). *Pleistocene hydrology of North America: The role of ice sheets in reorganizing groundwater flow systems*. *Reviews of Geophysics*, 45(3).

- Pollock, D.W. (2017). *MODPATH v7.2.01: A particle-tracking model for MODFLOW*. U.S. Geological Survey Software Release, 15 December 2017. DOI: [10.5066/F70P0X5X](https://doi.org/10.5066/F70P0X5X).
- Pool, M. et Carrera, J. (2011). *A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers*. *Water Resources Research* 47 (5). DOI: [10.1029/2010WR010256](https://doi.org/10.1029/2010WR010256).
- Post, V., Kooi, H., et Simmons, C. (2007). *Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses*. *Groundwater*, 45(6), pp. 664-671.
- Post, V. E., Banks, E., et Brunke, M. (2018). *Groundwater flow in the transition zone between freshwater and saltwater: a field-based study and analysis of measurement errors*. *Hydrogeology Journal*, 26(6), pp. 1821-1838.
- Poulin, M. (1977). *Étude hydrogéologique des Îles de Grosse-Île et de Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine*. Dorval (Qc), Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 53 p. et annexes.
- Radio-Canada (2016). *Déversement d'hydrocarbures : deux ans de travaux pour réhabiliter le port de Cap-aux-Meules*. Nouvelle parue le 21 janvier 2016. [En ligne]. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/760900/gaspesie-hydro-quebec-cap-aux-meules-deversement-diesel> (page consultée le 9 décembre 2021).
- Radio-Canada (2018). *Inventaire des puits abandonnés aux Îles-de-la-Madeleine*. Nouvelle parue le 9 octobre 2018. [En ligne]. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1128844/inventaire-des-puits-abandonnes-aux-iles-de-la-madeleine> (page consultée le 9 décembre 2021).
- Radio-Canada (2020). *L'exploration du gisement Old Harry abandonnée*. Nouvelle parue le 23 janvier 2020. [En ligne]. <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/le-reveil-ile-du-prince-edouard/segments/entrevue/152178/exploration-petrole-gisement-old-harry-golfe-saint-laurent> (page consultée le 20 janvier 2022).
- Ressources naturelles Canada (2021). *Classification des forêts*. [En ligne]. [https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets/amenagement-forestier-durable-canada/mesures-et-rapports/classification-des-forets/13180?\\_ga=2.140710970.927178282.1637186206-1094257244.1635202661](https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets/amenagement-forestier-durable-canada/mesures-et-rapports/classification-des-forets/13180?_ga=2.140710970.927178282.1637186206-1094257244.1635202661) (page consultée le 17 novembre 2021).
- Roche (1999). *Étude hydrogéologique - aéroport des Îles-de-la-Madeleine, Rapport final*. Québec (Qc), n°20854-000. Rapport produit pour Transports Canada. 47 p. et annexes.
- Roy-Bolduc, A. (2010) *Portrait et historique d'utilisation de l'écosystème forestier des Îles-de-la-Madeleine*. Centre de recherche sur les milieux insulaires maritimes (CERMIM).
- RQES (2019). *Atelier 1 - Découvrir notre projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines et le lien aux enjeux de notre territoire. Îles de la Madeleine. Cahier des résultats*. Document préparé par le Réseau québécois sur les eaux souterraines pour les acteurs de l'aménagement du territoire. Montréal et Trois-Rivières. Réseau québécois sur les eaux souterraines et Université du Québec à Trois-Rivières.

- Santé Canada (2019a). *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Tableau sommaire*. [En ligne]. <https://www.canada.ca/fr/santxcanada/services/santxenvironnement-milieu-travail/rapports-publications/qualitxeau/recommandations-qualitxeau-potablxcanada-tableau-sommaire.html> (page consultée le 11 octobre 2019).
- Santé Canada (2019b). *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – le manganèse*. [En ligne]. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-manganese.html#a7.4> (page consultée le 4 mars 2022).
- Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M. et Zappi, P.A. (1994). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: User's guide for version 3*. EPA/600/R-94/168a, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC
- Shalev, E., Lazar, A., Wollman, S., Kington, S., Yechieli, Y. et Gvirtzman, H. (2009). *Biased monitoring of freshwater – saltwater mixing zone in coastal aquifers*. *GroundWater*, 47, (1): pp. 49-56.
- Shaw, J., Gareau, P. et Courtney, R. C. (2002). *Palaeogeography of Atlantic Canada 13–0 kyr*. *Quaternary Science Reviews*, 21, pp. 1861–1878.
- Springer, R. K., et Gelhar, L. W. (1991). *Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response*. Cape Cod, Massachusetts. U.S. Geological Survey Water Res. Invest. Rep. 91, pp. 36-40.
- Stantec (2018). *Caractérisation environnementale de site Aéroport des Îles-de-la-Madeleine Havre-aux-Maisons Québec*. Saint-Laurent (Qc), n°167011905. Rapport produit pour Transports Canada. 46 p. et annexes.
- Statistique Canada (2017). *Les Îles-de-la-Madeleine, MÉ [Subdivision de recensement], Québec et Québec [Province] (tableau). Profil du recensement, Recensement de 2016, produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada*. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017. [En ligne]. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F> (page consultée le 13 mai 2021).
- Sylvestre, M. (1974). *A finite element model for saltwater upconing and its application to the Magdalen Islands aquifer*. Thesis (M.Sc.) in earth sciences, University of Waterloo (ON), 112 p. et annexes.
- Sylvestre, M. (1979a). *Étude par modèle mathématique des nappes souterraines de la Grosse Île et de l'Île de la Grande Entrée, Îles-de-la-Madeleine*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 69 p. et annexes.
- Sylvestre, M. (1979b). *Carte hydrogéologique des Îles-de-la-Madeleine (Rapport préliminaire)*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 22 p. et figures.
- Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F. et Bérubé, S. (2013). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 p., 19 annexes et 28 cartes.

- Tardif, L. (1967). *Pédologie des Îles-de-la-Madeleine*. Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Gouvernement du Québec, 46 p. et annexes.
- TechnoRem (2005). *Modélisation et suivi de la qualité des eaux souterraines - aéroport des Îles-de-la-Madeleine*. Laval (Qc), n°PR04-69. Rapport produit pour Transports Canada. 87 p. et annexes.
- Therrien, R. (2010). *Hydrogéologie*. Notes de cours, GGL 2600. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. 260 p.
- Thiem, G. (1906). *Hydrologische methoden*. Leipzig. Germany, J.M. Gebhart, 56 p.
- Tourisme Îles de la Madeleine (2017). *Rapport annuel de Tourisme des Îles de la Madeleine 2016-2017*. 30 p.
- Tourisme Îles de la Madeleine (2019). *Rapport annuel de Tourisme des Îles de la Madeleine 2018-2019*. 44 p.
- Tourisme Îles de la Madeleine (2021). *Présentation Bilan de saison 2021*. Présentation donnée par l'Association touristique régionale, lors de la journée du tourisme, 21 octobre 2021.
- Tremblay, Y., Lemieux, J.-M., Fortier, R., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Comeau, G. et Talbot Poulin, M.-C. (2015). *Semi-automated filtering of data outliers to improve spatial analysis of piezometric data*. Hydrogeology Journal, Vol. 23, No. 5, pp. 851-868.
- Tremblay, Y., Gatel, L. et Molson, J. (2021). *Rapport d'analyse de la vulnérabilité de la source pour les prélèvements d'eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine – Version corrigée d'août 2021*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. 166 p. et annexes.
- Tremblay, Y., Gatel, L. et Molson, J. (2022). *Rapport d'analyse de la vulnérabilité de la source pour les prélèvements d'eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine – Mise à jour 2022*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval.
- Urumović, K. et Urumović Sr, K. (2016). *The referential grain size and effective porosity in the Kozeny-Carman model*. Hydrology and Earth System Sciences, 20(5), pp. 1669-1680.
- Villeneuve, G.-O. (1967). *Aperçu climatique des Îles de la Madeleine*. Ministère des Richesses naturelles du Québec. 69 p.
- Westenbroek, S.M., Kelson, V.A., Dripps, W.R., Hunt, R.J. et Bradbury, K.R. (2010). *SWB—A modified Thornthwaite-Mater Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A31, 60 p.
- Westenbroek, S.M., Engott, J.A., Kelson, V.A. et Hunt, R.J. (2018). *SWB Version 2.0—A Soil-Water-Balance code for estimating net infiltration and other water-budget components*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A59, 118 p.
- White, J. T., Fienen, M. N., Barlow P. M., et Welter, D. E. (2018), *A tool for efficient, model-independent management optimization under uncertainty*. Environmental Modelling & Software, 100, pp. 213-221.

World Health Organization (WHO) (2003). *Chloride in Drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

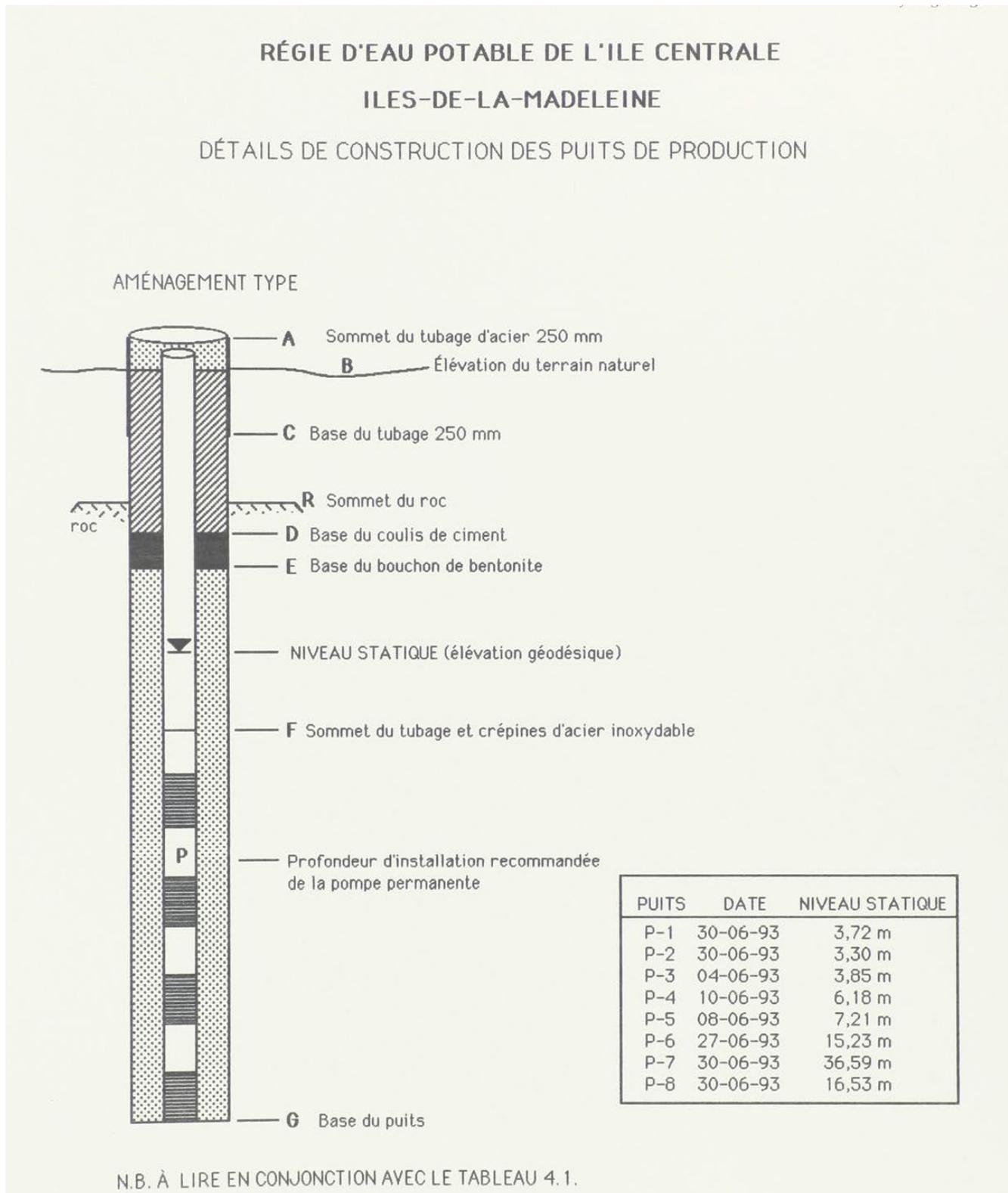
Yrro, B.J.F., Bouchedda, A., Claprood, M., Gloaguen, E. et Comte, J.-C. (2020). *Développement d'une méthodologie de caractérisation des aquifères côtiers applicables aux Îles de la Madeleine*. Institut national de la recherche scientifique, Centre - Eau Terre Environnement, Québec, Qc, 25 p. et annexes.

Zychowski J. et Bryndal T. (2015). *Impact of cemeteries on groundwater contamination by bacteria and viruses – a review*. J Water Health, Jun 13(2) : pp. 285-301.

## **ANNEXES**

## **Annexe 1 : Schémas d'aménagement et descriptions stratigraphiques des puits d'approvisionnement municipaux**

**Île du Cap aux Meules**



**Figure A.1 : Schéma d'aménagement des puits P-1 À P-8 sur l'île du Cap aux Meules (Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc., 1993)**

**Tableau A.1 : Détail de construction des puits de production (Donat Bilodeau Experts-Conseil Inc., 1993)**

**Tableau 4.1: détail de construction des puits de production**

puits	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)	G (m)	P (m)	R (m)
1	1,00	36,51	6,20	8,20	9,20	32,60	63,70	39,50	6,40
2	1,00	29,04	3,90	5,90	6,90	29,90	61,00	37,50	2,00
3	0,80	15,33	4,80	8,40	9,40	16,64	39,60	19,80	1,83
4	1,07	22,83	4,13	6,13	7,13	26,70	45,70	28,60	2,40
5	0,97	29,97	3,93	5,10	6,10	27,95	57,00	39,00	1,83
6	1,00	40,47	3,60	5,60	6,60	63,70	92,70	46,00	1,50
7	1,00	41,02	4,10	6,10	7,10	31,10	62,20	48,50	2,00
8	1,04	32,36	5,06	7,06	8,06	27,90	48,80	38,00	0,30

**A:** Sommet du tubage de 250 mm;

**B:** élévation du terrain naturel (TN);

**C:** profondeur de la base du tubage de 250 mm sous le TN;

**D:** profondeur de la base du coulis de ciment sous le TN;

**E:** profondeur de la base du bouchon de bentonite sous le TN;

**F:** profondeur du sommet du tubage en acier inoxydable sous le TN;

**G:** profondeur de la base du puits de production sous le TN;

**P:** profondeur de la prise d'eau de la pompe permanente sous la margelle;

**R:** profondeur du roc sous le TN.

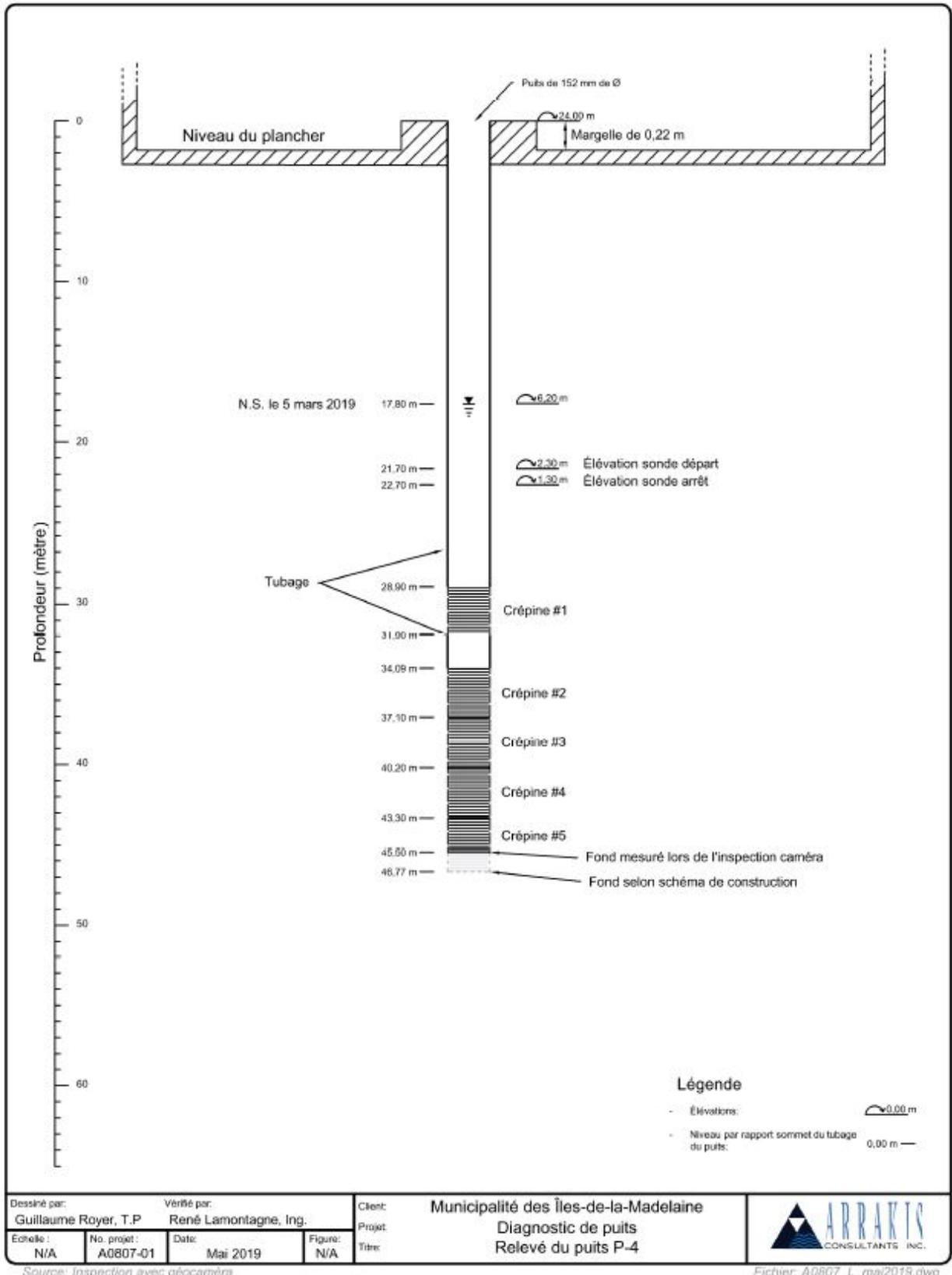


Figure A.2 : Relevé du puits P-4, île du Cap aux Meules (Arrakis, 2019)

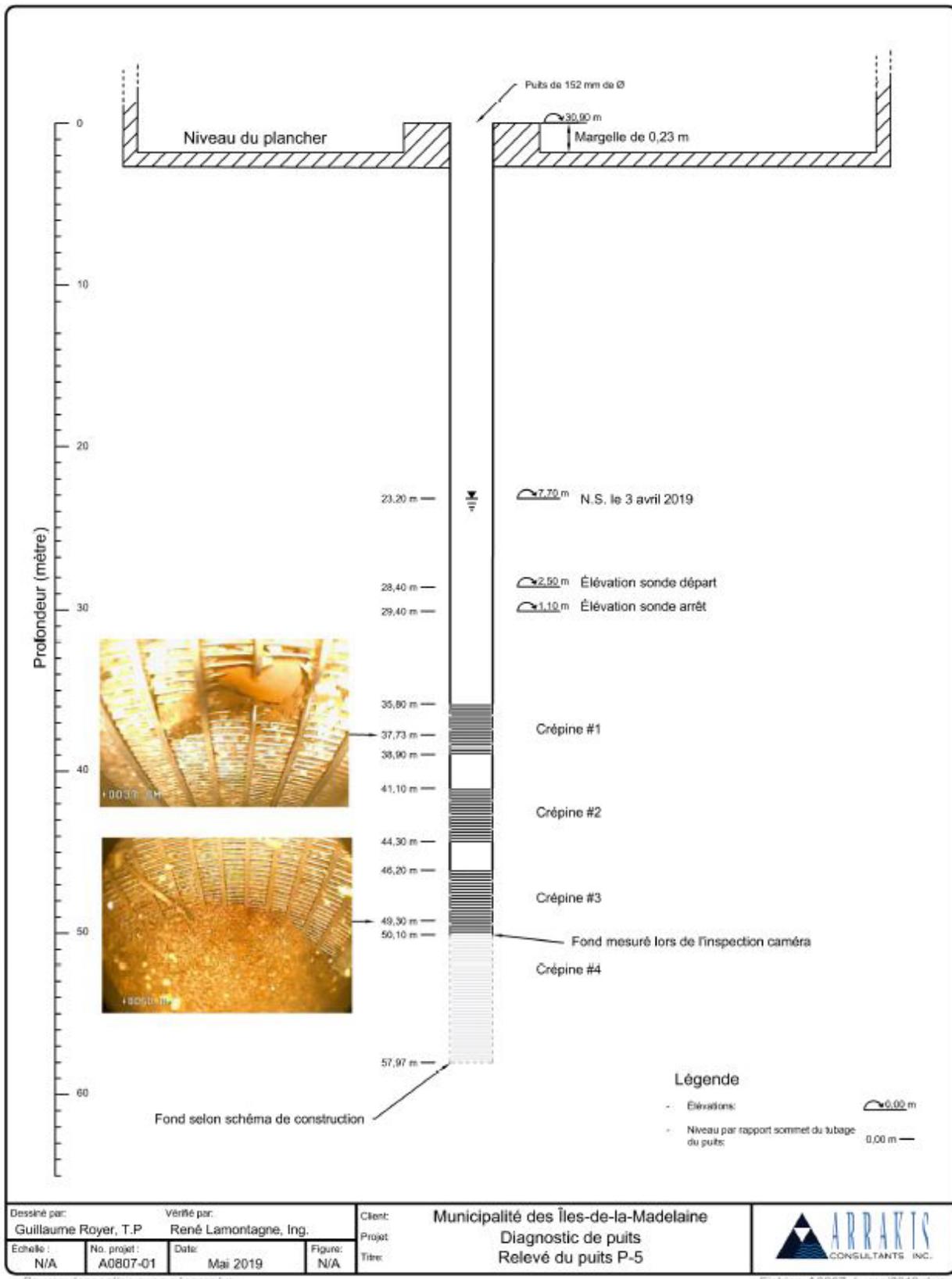


Figure A.3 : Relevé du puits P-5, île du Cap aux Meules (Arrakis, 2019)

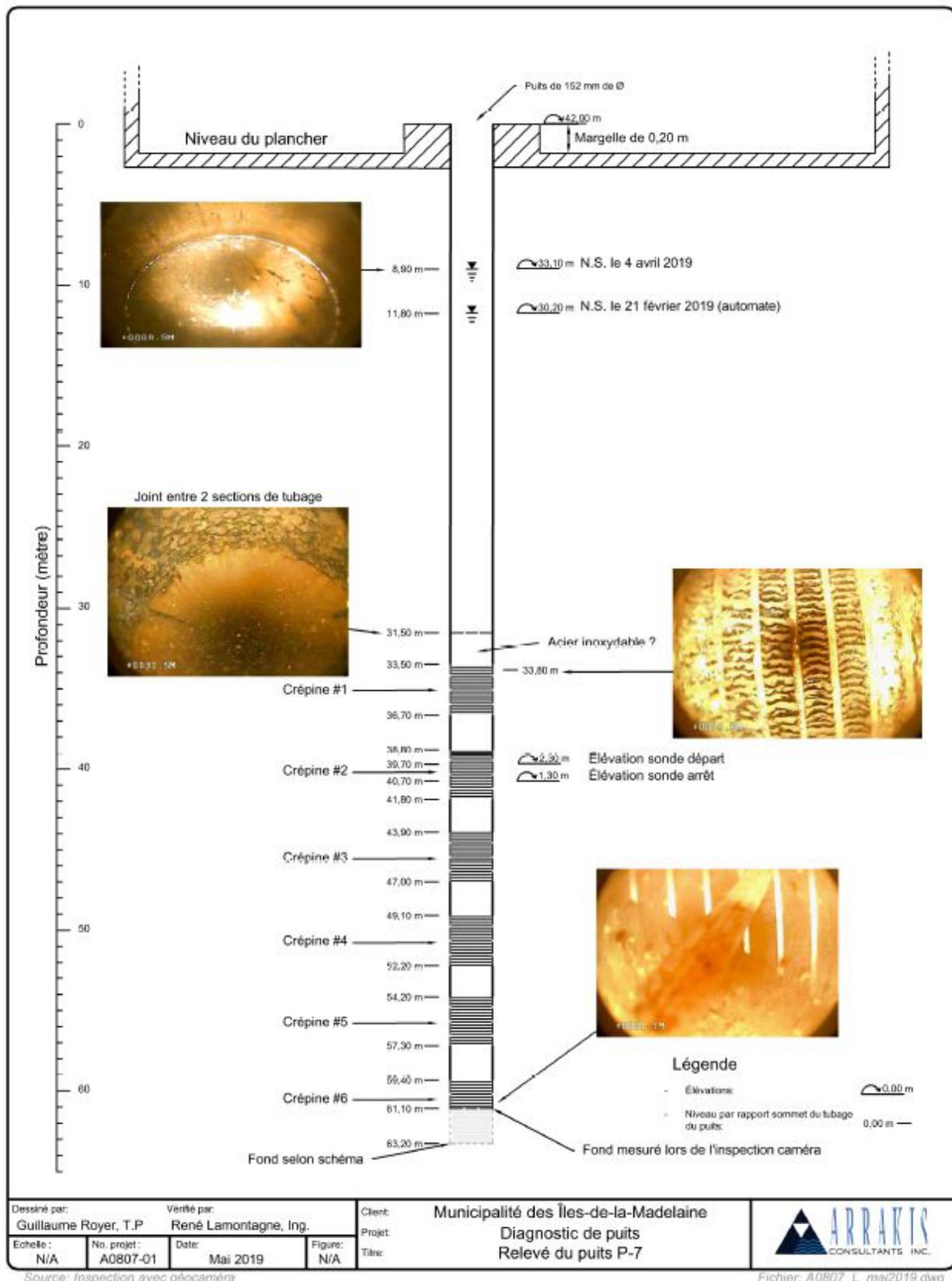


Figure A.4 : Relevé du puits P-7, île du Cap aux Meules (Arrakis, 2019)

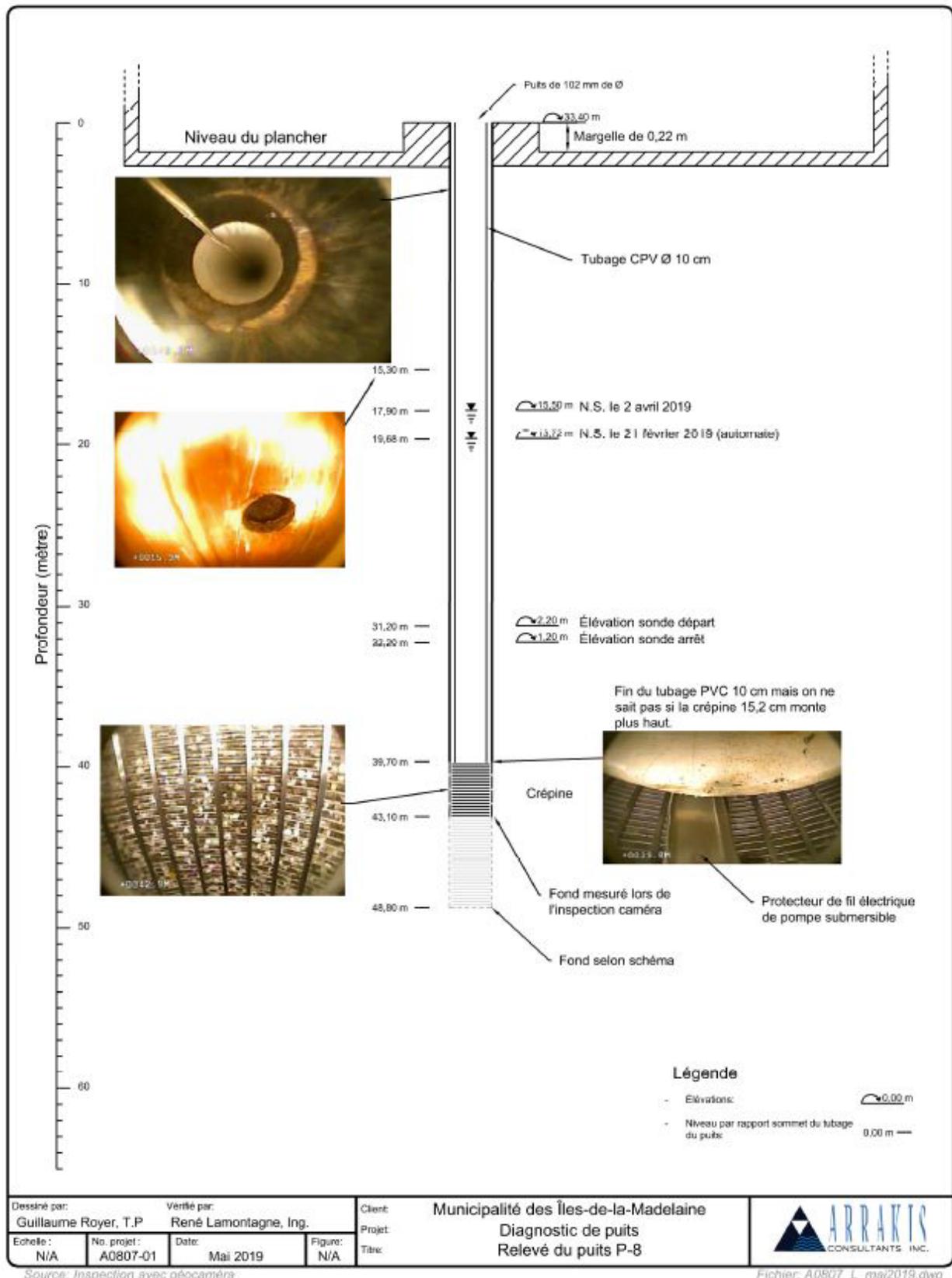


Figure A.5 : Relevé du puits P-8, île du Cap aux Meules (Arrakis, 2019)

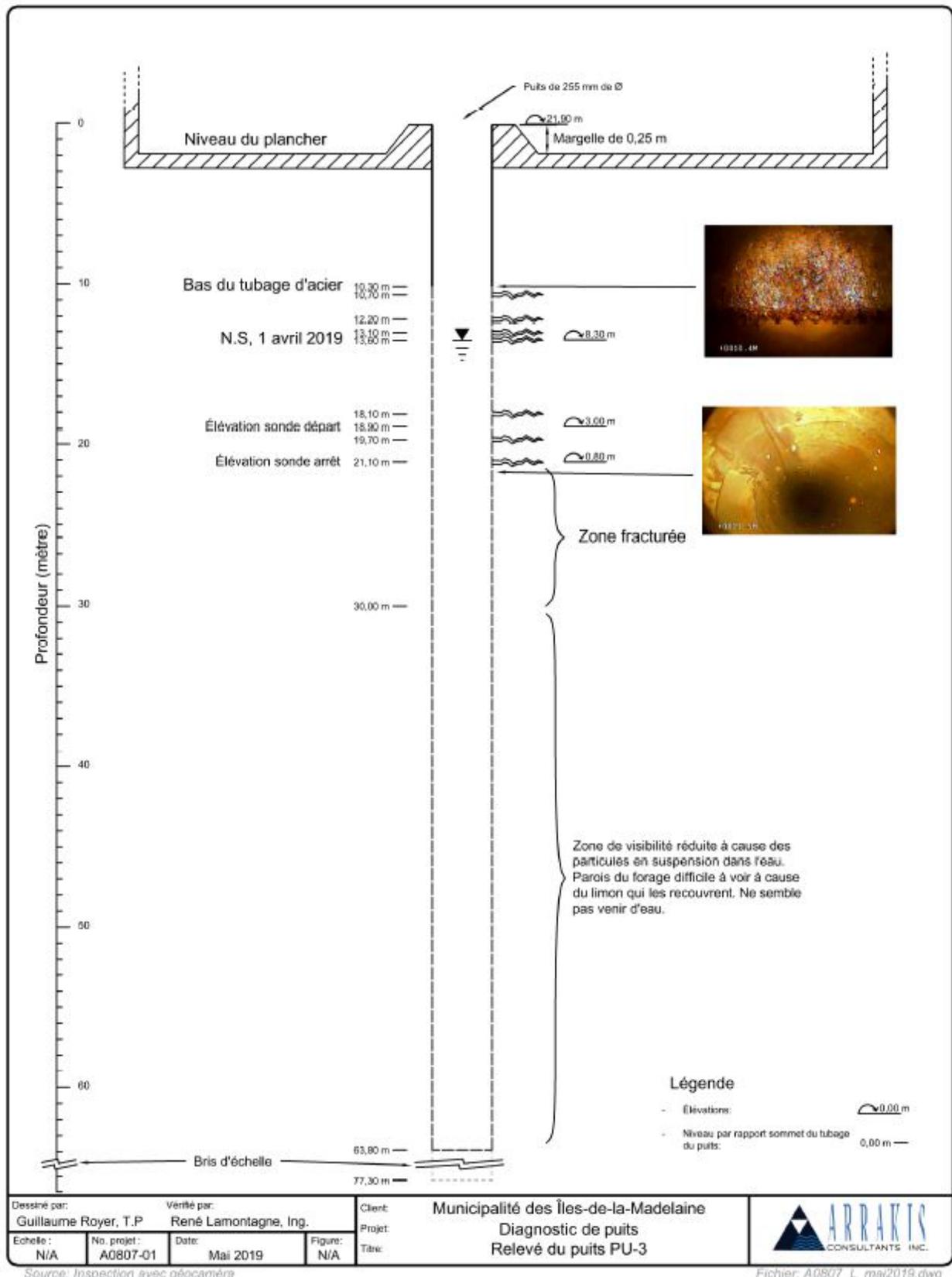


Figure A.6 : Relevé du puits PU-3, île du Cap aux Meules (Arrakis, 2019)

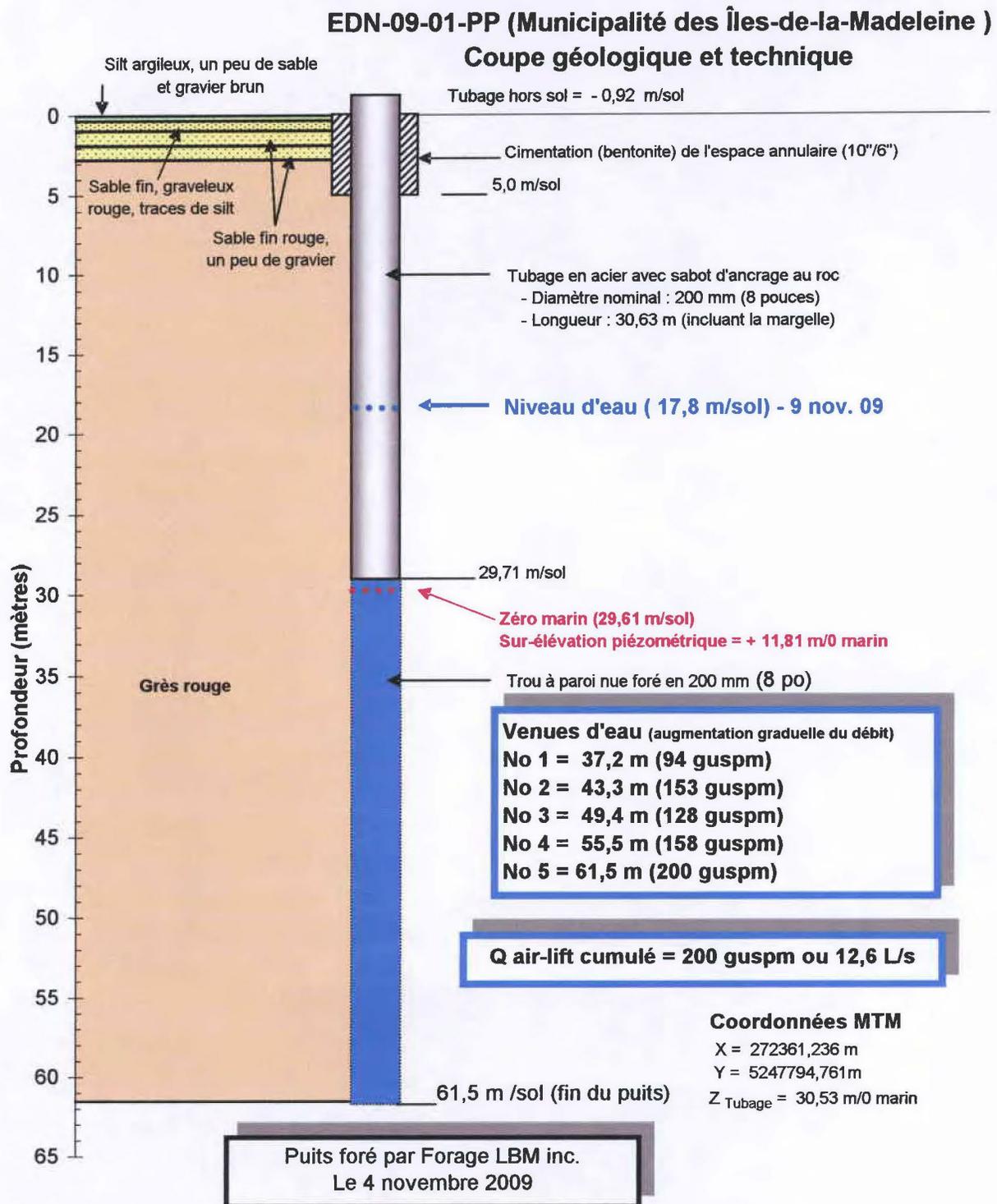


Figure A.7 : Schéma d'aménagement du puits EDN-09-01-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010a)

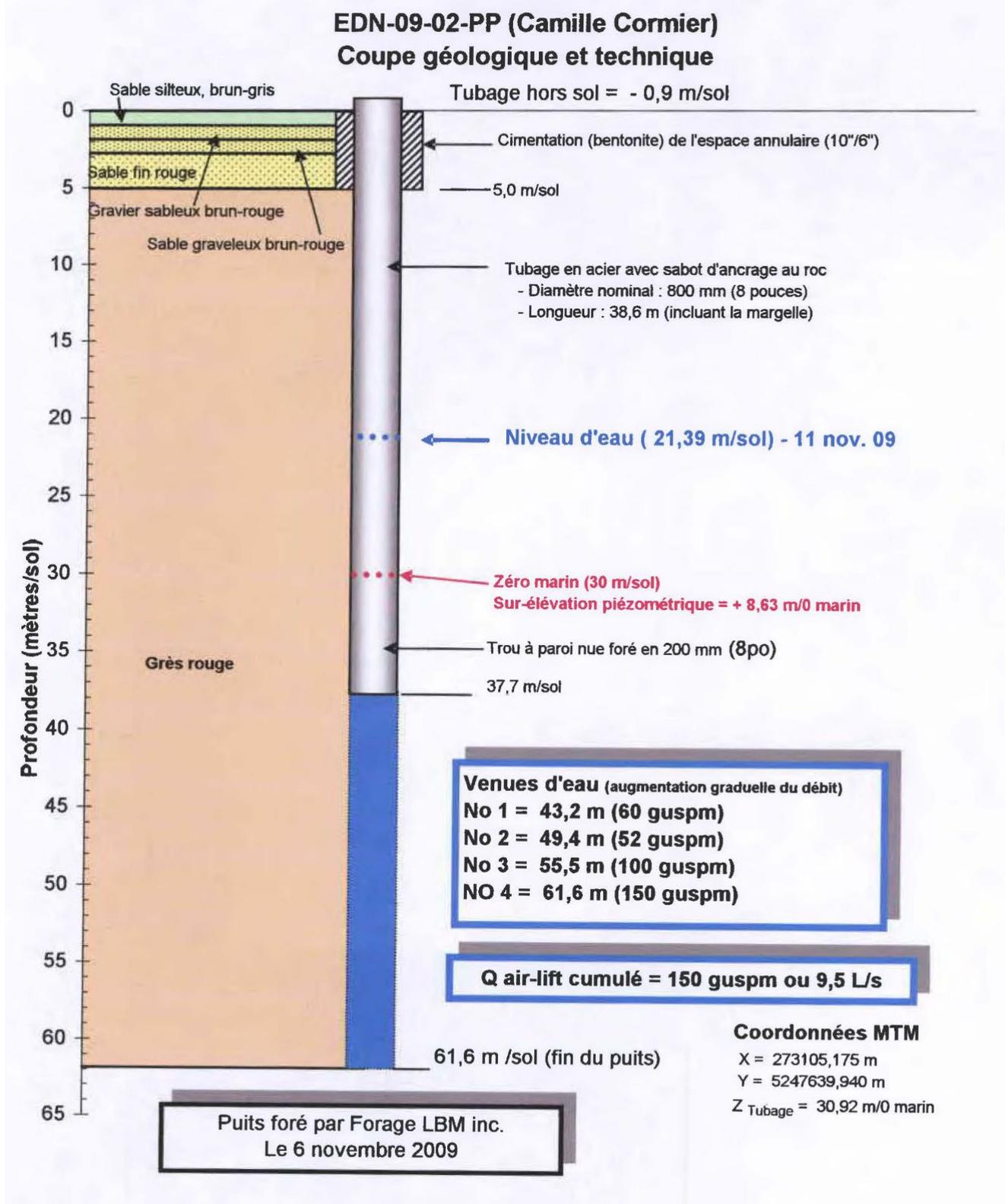


Figure A.8 : Schéma d'aménagement du puits EDN-09-02-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010a)

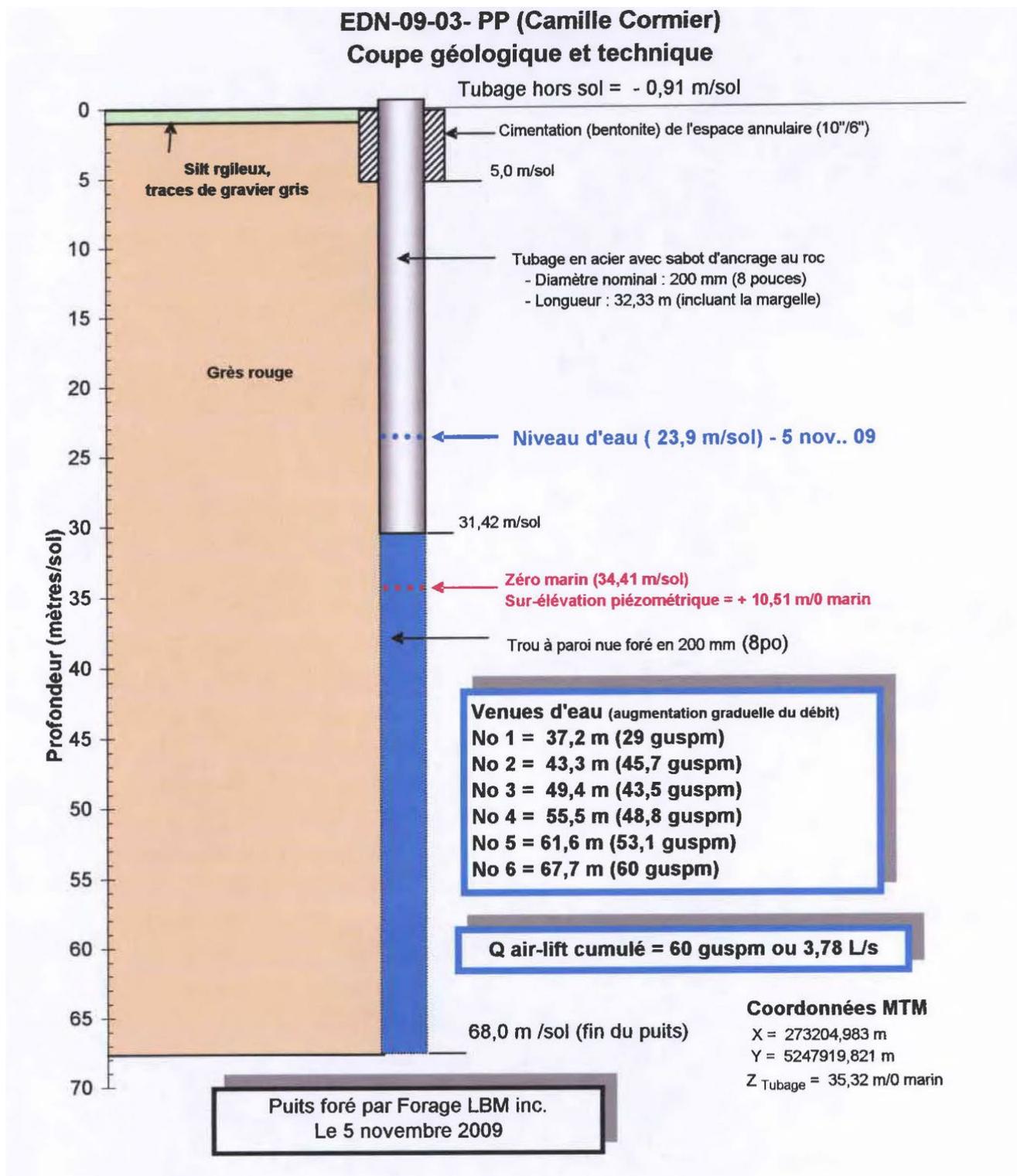


Figure A.9 : Schéma d'aménagement du puits EDN-09-03-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010a)

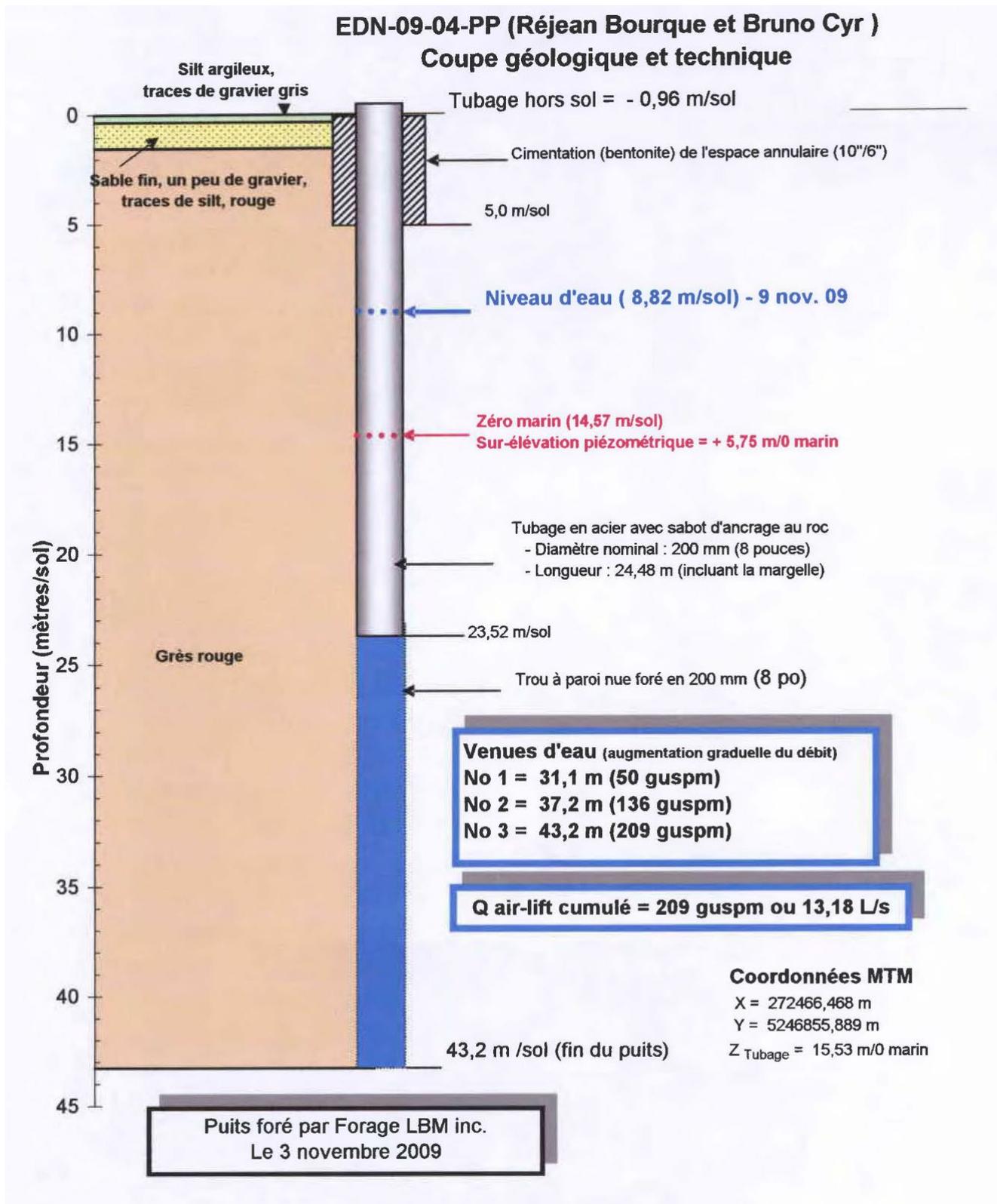


Figure A.10 : Schéma d'aménagement du puits EDN-09-04-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010a)

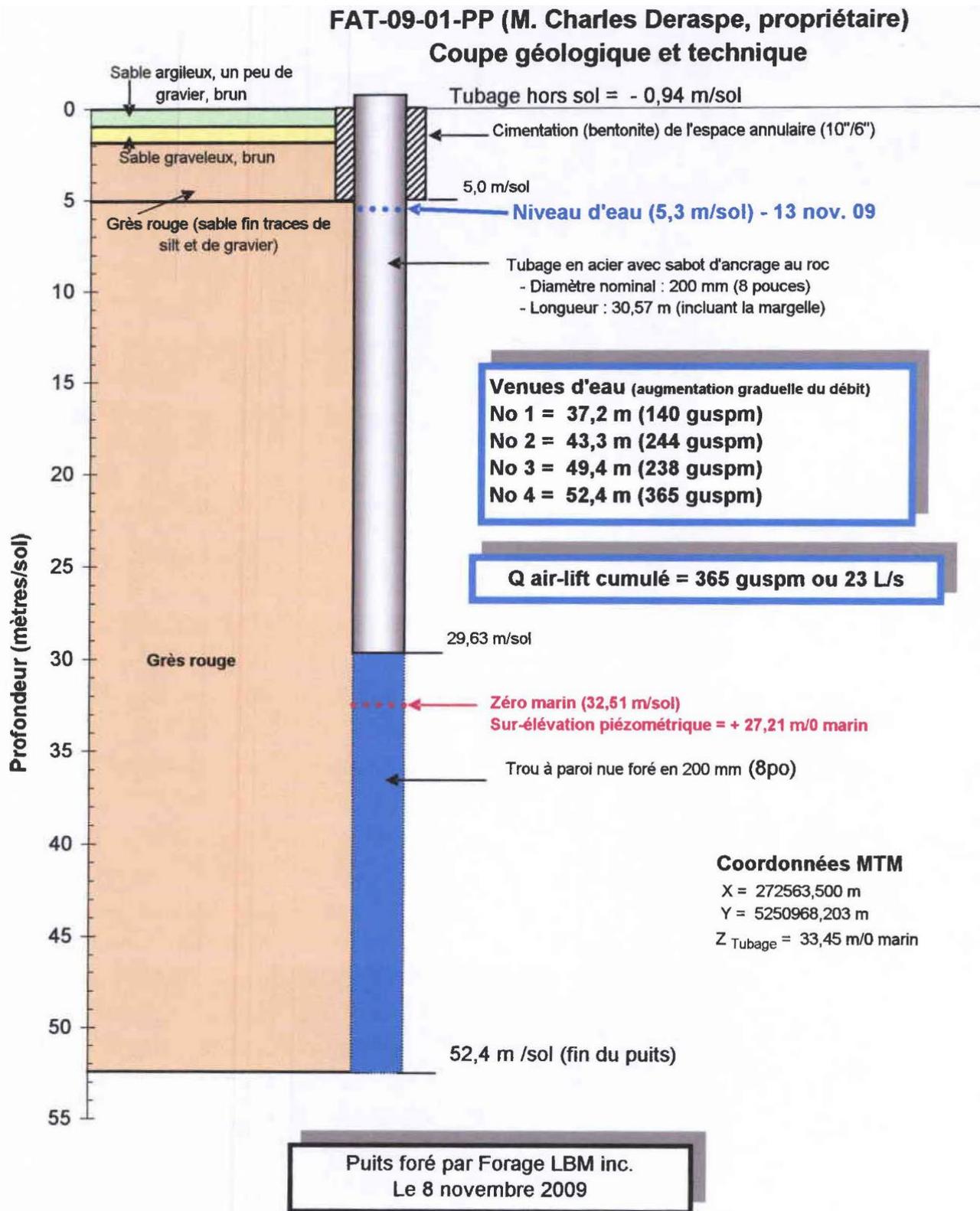


Figure A.11 : Schéma d'aménagement du puits FAT-09-01-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010b)

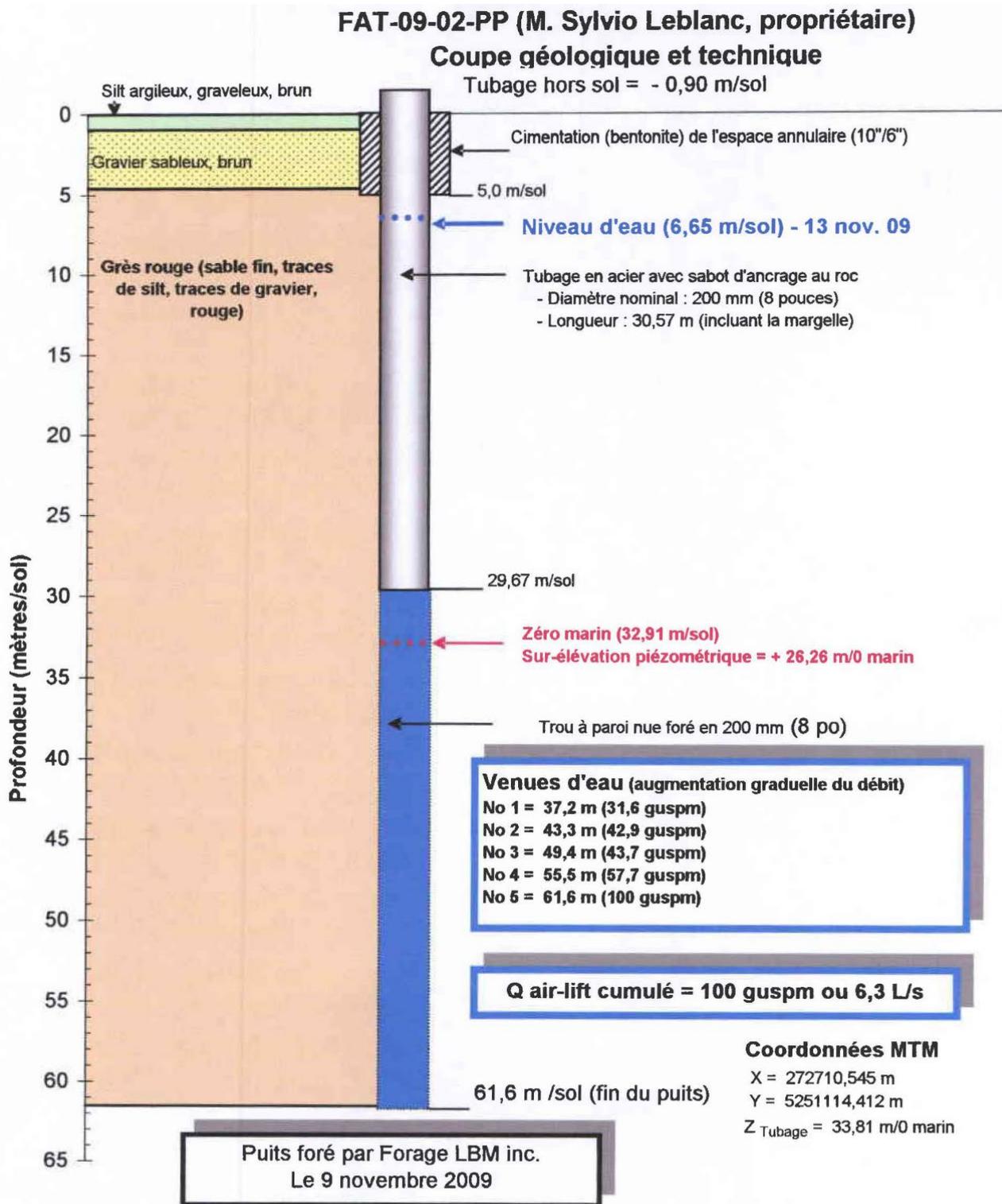


Figure A.12 : Schéma d'aménagement du puits FAT-09-02-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010b)

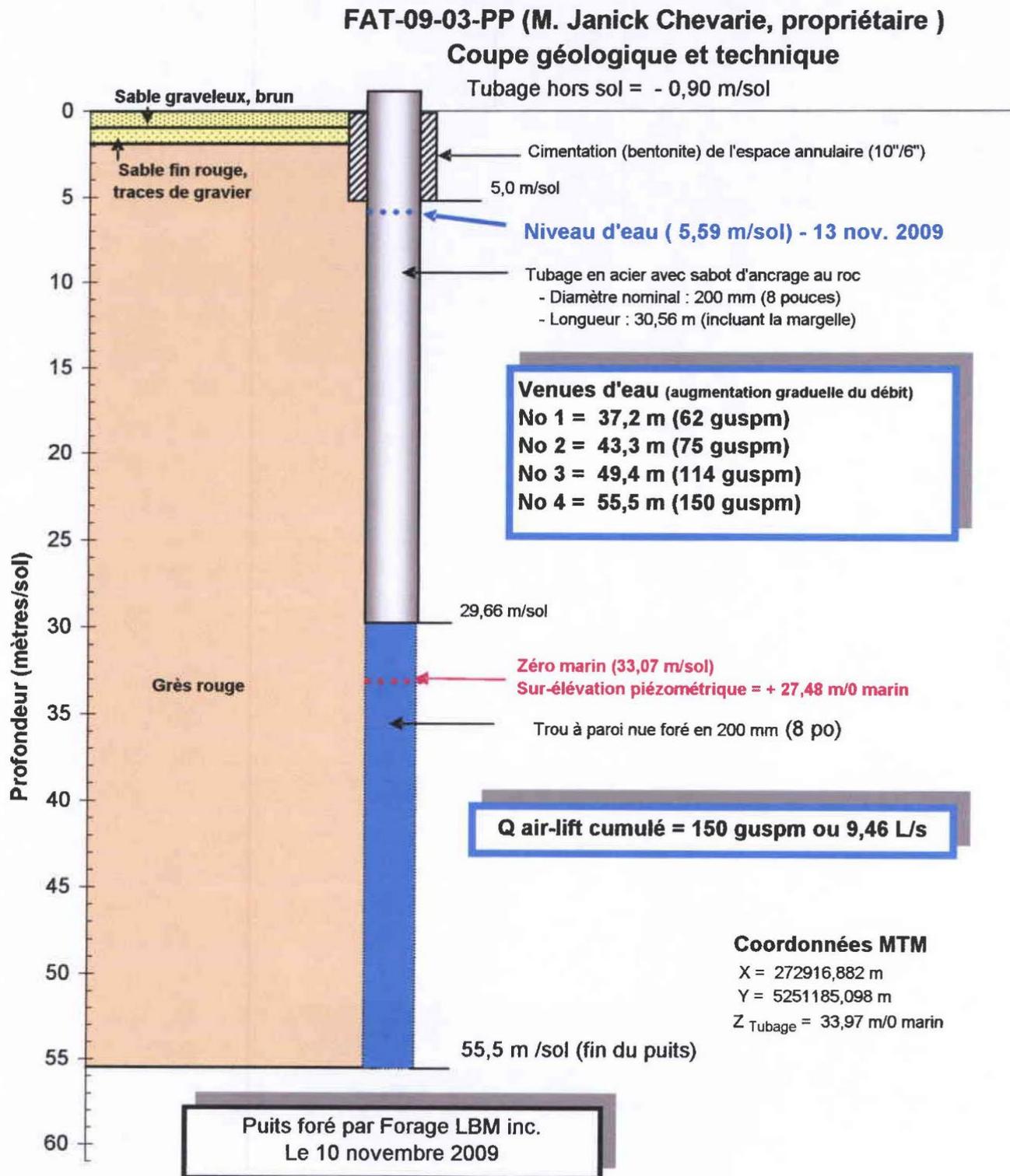


Figure A.13 : Schéma d'aménagement du puits FAT-09-03-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010b)

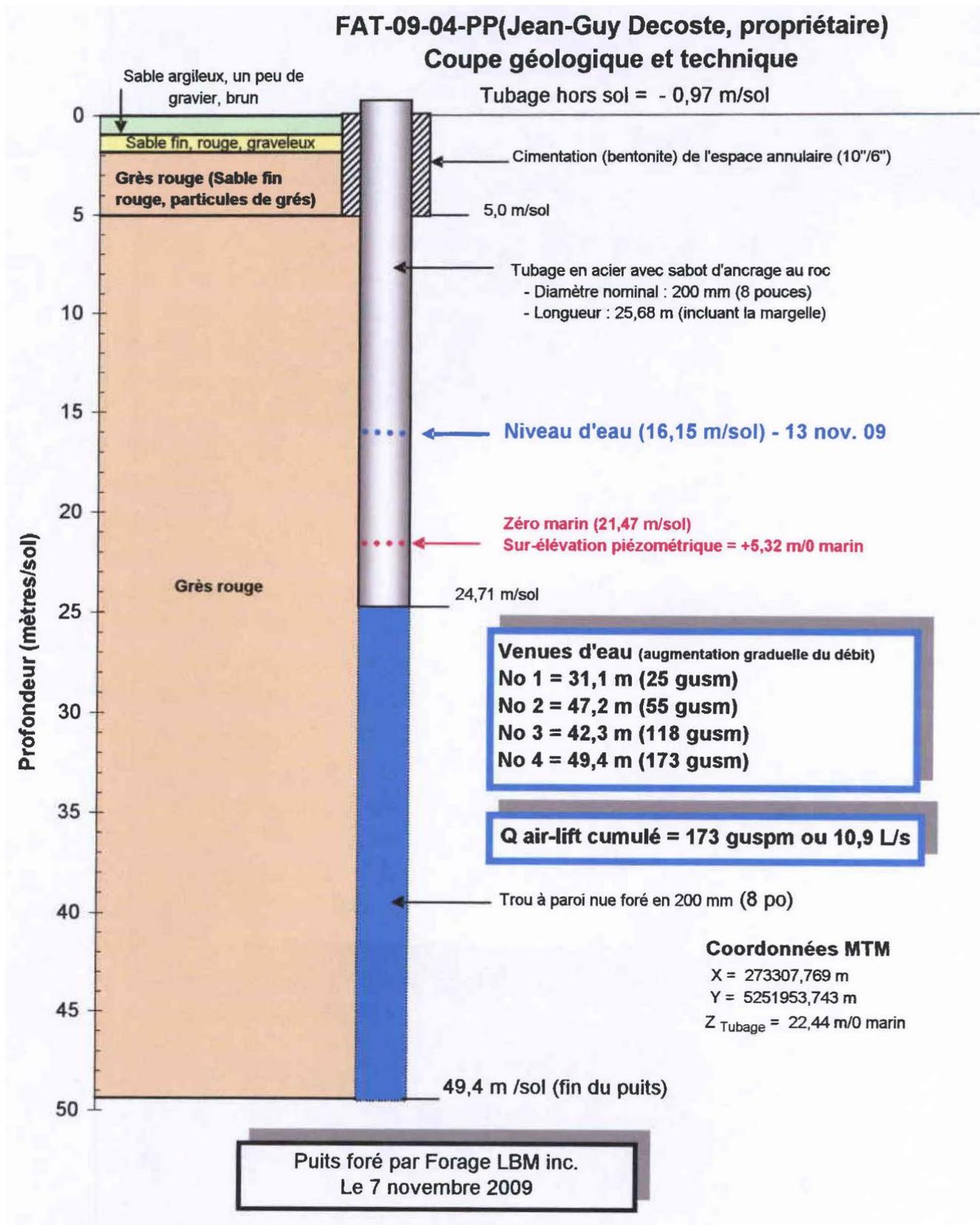


Figure A.14 : Schéma d'aménagement du puits FAT-09-04-PP (Groupe Madelin'Eau, 2010b)

**Tableau A.2 : Description de la séquence stratigraphique des puits municipaux de l'île du Cap aux Meules**

Nom du puits	Profondeur de (m)	Profondeur à (m)	Description stratigraphique
PU1	0,00	0,30	Terre végétale
	0,30	15,24	Sable compact, gravier rouge
	15,24	64,01	Grès rouge
PU2	0,00	9,14	Sable jaune compact
	9,14	18,29	Grès jaune
	18,29	19,81	Grès jaune, très mou
	19,81	24,38	Grès gris, très mou
	24,38	71,63	Grès gris
PU3	0,00	0,30	Terre végétale
	0,30	5,49	Sable compact, gravier
	5,49	68,58	Grès rouge
PU4	nd	nd	nd
PU5	nd	nd	nd
PU6	nd	nd	nd
PU7	0,00	7,62	Sable rouge silteux, compact
	7,62	76,20	Grès rouge
PU8	0,00	7,62	Sable et gravier
	7,62	18,29	Grès rouge mou
	18,29	71,63	Grès rouge
PU9	0,00	10,00	Argile sablonneuse
	10,00	24,60	Argilite
	24,60	76,20	Grès
PU10	0,00	10,00	Argile sablonneuse
	10,00	76,20	Grès
P1	0,00	6,40	Dépôt meuble
	6,40	63,70	Roc
P2	0,00	2,00	Dépôt meuble
	2,00	61,00	Roc
P3	0,00	1,83	Dépôt meuble
	1,83	39,60	Roc
P4	0,00	2,40	Dépôt meuble
	2,40	45,70	Roc
P5	0,00	1,83	Dépôt meuble
	1,83	57,00	Roc
P6	0,00	1,50	Dépôt meuble
	1,50	92,70	Roc
P7	0,00	2,00	Dépôt meuble
	2,00	62,20	Roc
P8	0,00	0,30	Dépôt meuble
	0,30	48,80	Roc

**Tableau A.2 : Description de la séquence stratigraphique des puits municipaux de l'île du Cap aux Meules (suite)**

Nom du puits	Profondeur de (m)	Profondeur à (m)	Description stratigraphique
EDN-09-01PP	0,00	0,20	Silt argileux, un peu de sable et gravier brun
	0,20	1,00	Sable fin, graveleux rouge, traces de silt
	1,00	2,90	Sable fin rouge, un peu de gravier
	2,90	61,50	Grès rouge
EDN-09-02PP	0,00	1,00	Sable silteux, brun-gris
	1,00	2,00	Gravier sableux brun-rouge
	2,00	3,00	Sable graveleux brun-rouge
	3,00	5,00	Sable fin rouge
	5,00	61,60	Grès rouge
EDN-09-03PP	0,00	1,00	Silt argileux, traces de gravier gris
	1,00	68,00	Grès rouge
	0,00	0,20	Silt argileux, traces de gravier gris
	0,20	1,50	Sable fin, un peu de gravier, traces de silt, rouge
	1,50	43,20	Grès rouge
EDN-09-04PP	0,00	0,20	Silt argileux, traces de gravier gris
	0,20	1,50	Sable fin, un peu de gravier, traces de silt, rouge
	1,50	43,20	Grès rouge
FAT-09-01PP	0,00	1,00	Sable argileux, un peu de gravier, brun
	1,00	1,90	Sable graveleux, brun
	1,90	5,00	Grès rouge (sable fin trace de silt et gravier)
	5,00	52,40	Grès rouge
FAT-09-02PP	0,00	0,80	Silt argileux, graveleux, brun
	0,80	4,80	Gravier sableux, brun
	4,80	61,60	Grès rouge (sable fin, traces de silt, traces de gravier, rouge)
FAT-09-03PP	0,00	1,00	Sable graveleux, brun
	1,00	1,90	Sable fin rouge, traces de gravier
	1,90	55,50	Grès rouge
FAT-09-04PP	0,00	1,00	Sable argileux, un peu de gravier, brun
	1,00	1,90	Sable fin, rouge, graveleux
	1,90	5,00	Grès rouge (Sable fin rouge, particules de grès)
	5,00	49,40	Grès rouge

### ***Île du Havre Aubert***

Aucun schéma d'aménagement n'est disponible pour les puits de cette île.

**Tableau A.3 : Description de la séquence stratigraphique des puits municipaux de l'île du Havre Aubert**

<b>Nom du puits</b>	<b>Profondeur de (m)</b>	<b>Profondeur à (m)</b>	<b>Description stratigraphique</b>
P1	0,00	0,30	Humus
	0,30	1,83	Sable rouge compacté
	1,83	76,20	Grès rouge mou, friable
P2	0,00	0,30	Humus
	0,30	0,76	Gravier
	0,76	76,20	Grès mou rouge, friable
P3	n.d.	n.d.	n.d.
P4	n.d.	n.d.	n.d.

**Île du Havre aux Maisons**

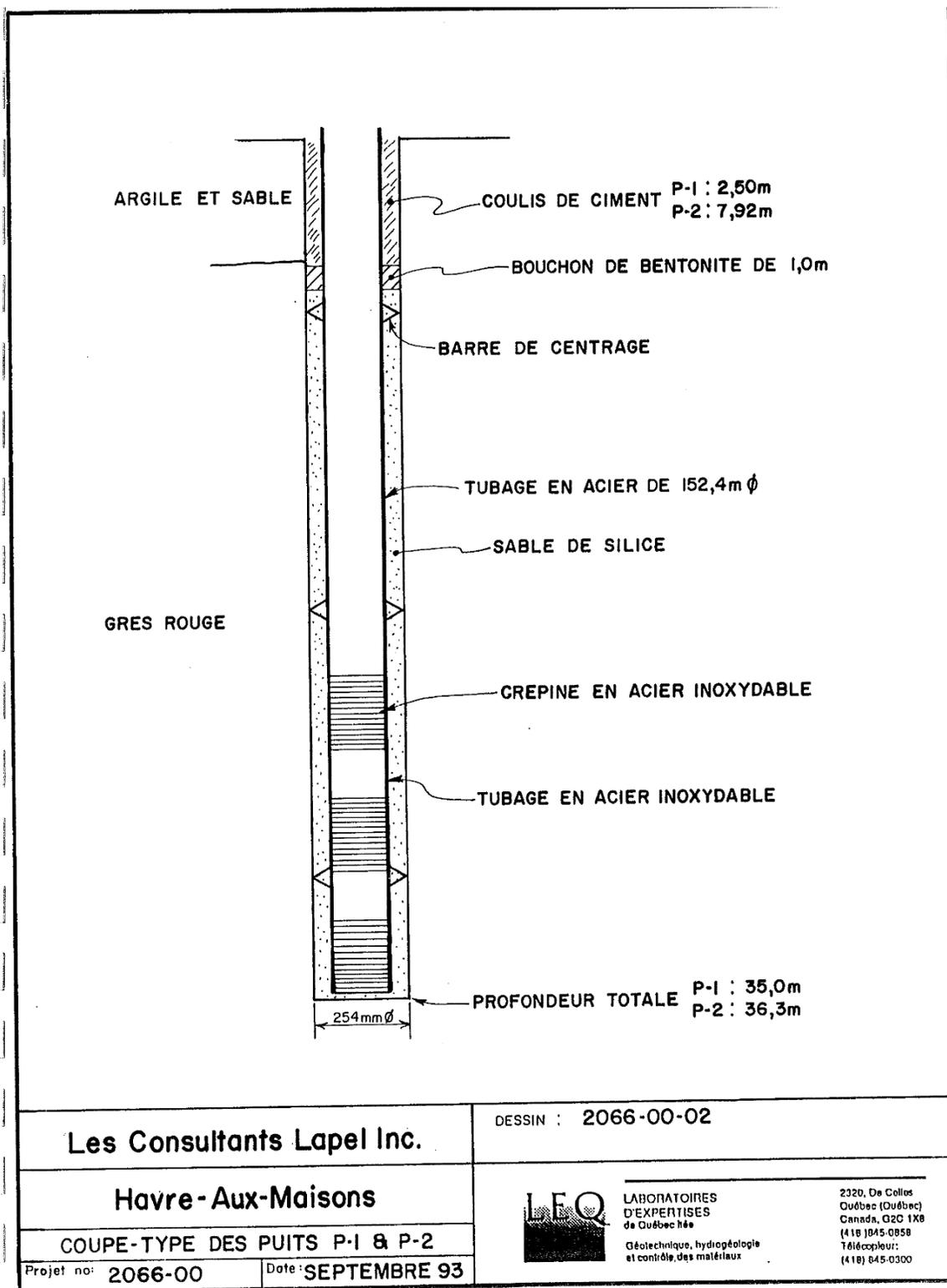


Figure A.15 : Schéma d'aménagement pour les puits P-1 et P-2, île du Havre aux Maisons (Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée, 1993)

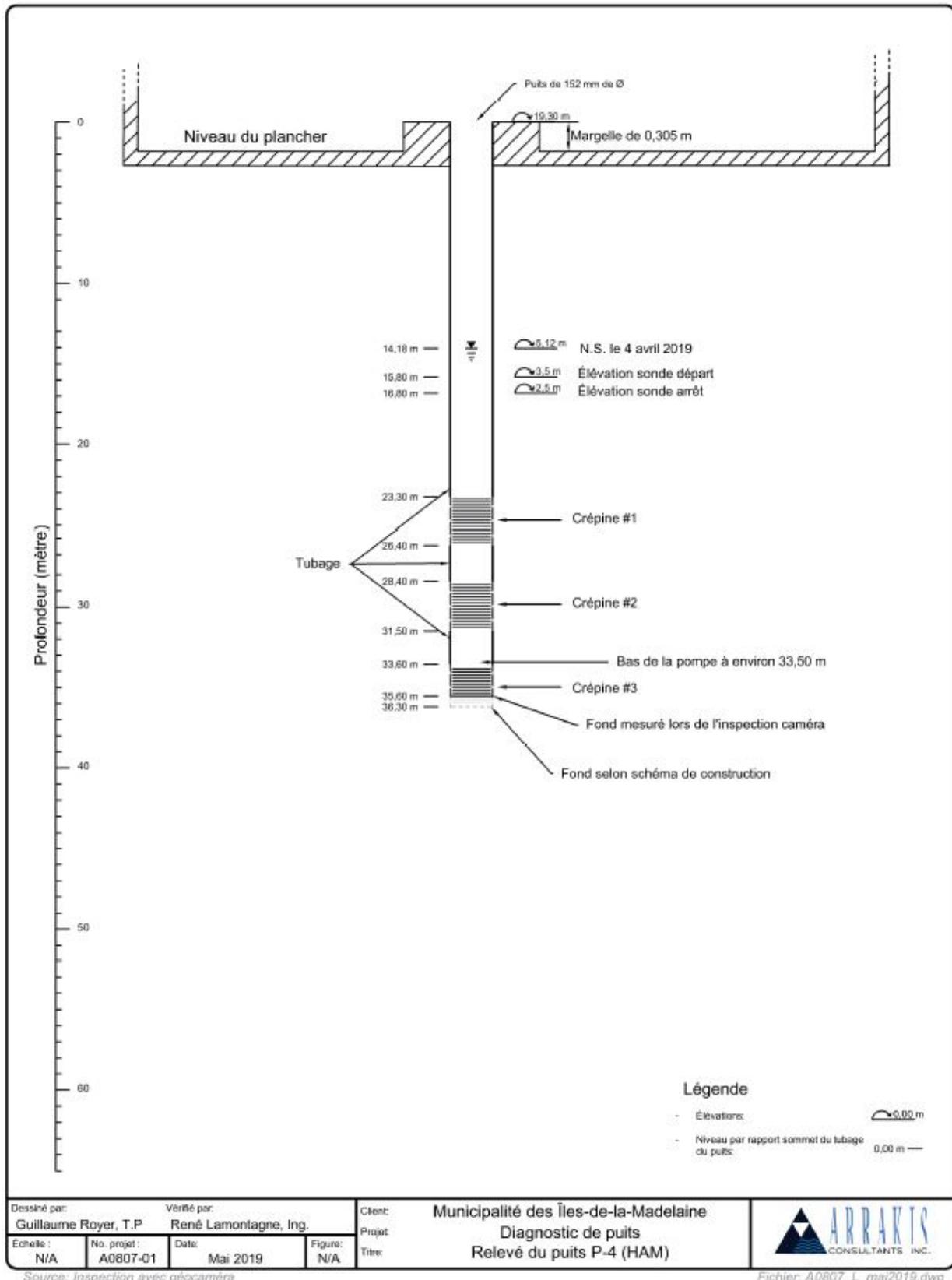


Figure A.16 : Schéma d'aménagement du puits P-4, île du Havre aux Maisons (Arrakis, 2019)

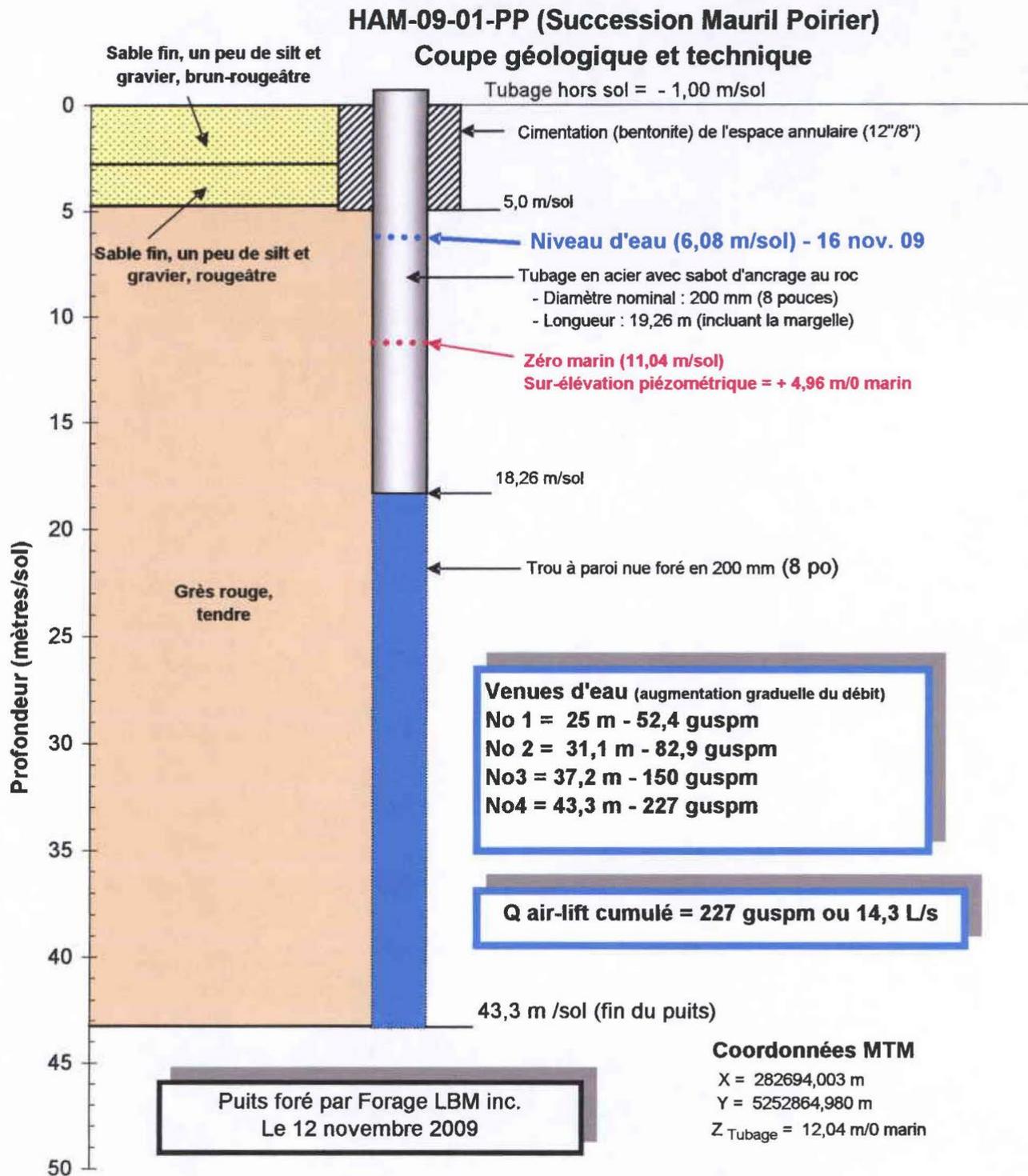


Figure A.17 : Schéma d'aménagement du puits HAM-09-01-PP, île du Havre aux Maisons (Groupe Madelin'Eau, 2010c)

### HAM-09-02PP (Municipalité des îles-de-la-Madeleine) Coupe géologique et technique

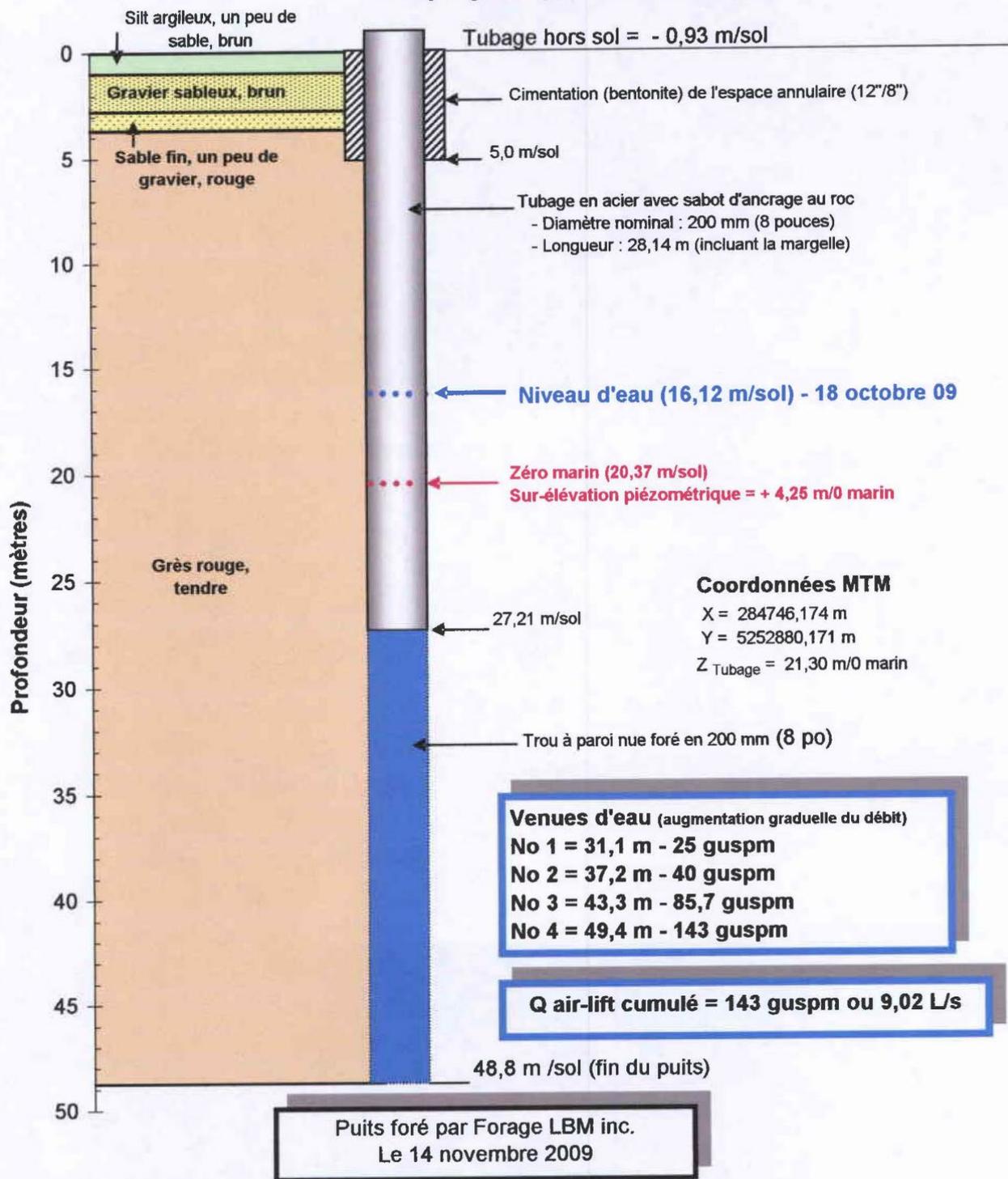


Figure A.18 : Schéma d'aménagement du puits HAM-09-02-PP, île du Havre aux Maisons (Groupe Madelin'Eau, 2010c)

**Tableau A.4 : Description de la séquence stratigraphique des puits municipaux de l'île du Havre aux Maisons**

Nom du puits	Profondeur de (m)	Profondeur à (m)	Description stratigraphique
P1	0,00	6,00	Mélange d'argile rouge, de sable et de roc trituré
	6,00	30,00	Grès rouge à grain fin
P2	0,00	6,00	Mélange d'argile rouge, de sable et de roc trituré
	6,00	30,00	Grès rouge à grain fin
P3	n.d.	n.d.	n.d.
P4	n.d.	n.d.	n.d.
HAM-09-01PP	0,00	2,80	Sable fin, un peu de silt et gravier, brun-rougeâtre
	2,80	4,80	Sable fin, un peu de silt et gravier, rougeâtre
	4,80	43,30	Grès rouge, tendre
HAM-09-02PP	0,00	1,00	Silt argileux, un peu de sable, brun
	1,00	2,80	Gravier sableux, brun
	2,80	3,80	Sable fin, un peu de gravier, rouge
	3,80	48,80	Grès rouge, tendre

Île de la Grande Entrée

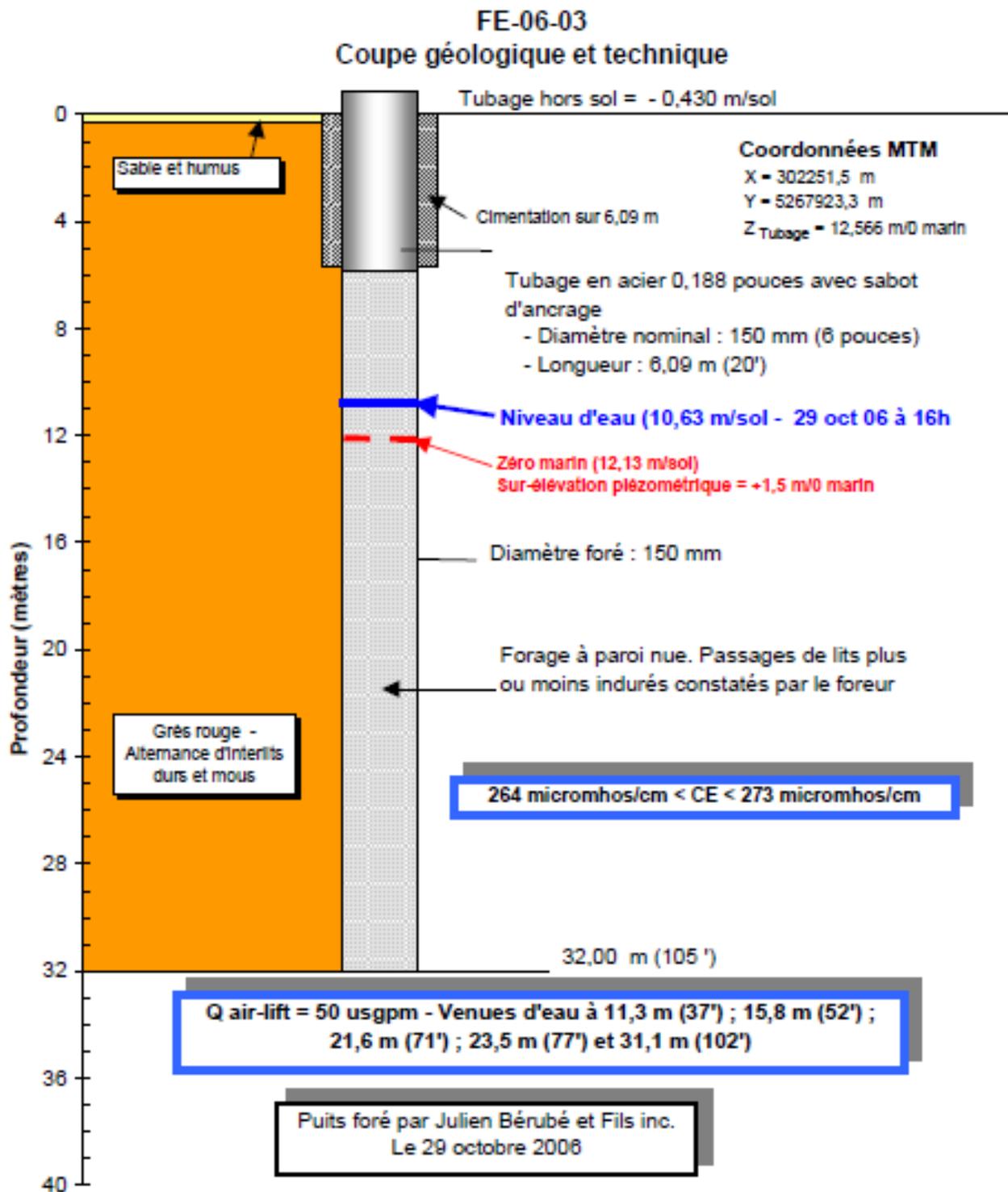


Figure A.19 : Schéma d'aménagement du puits FE-06-03, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2007)

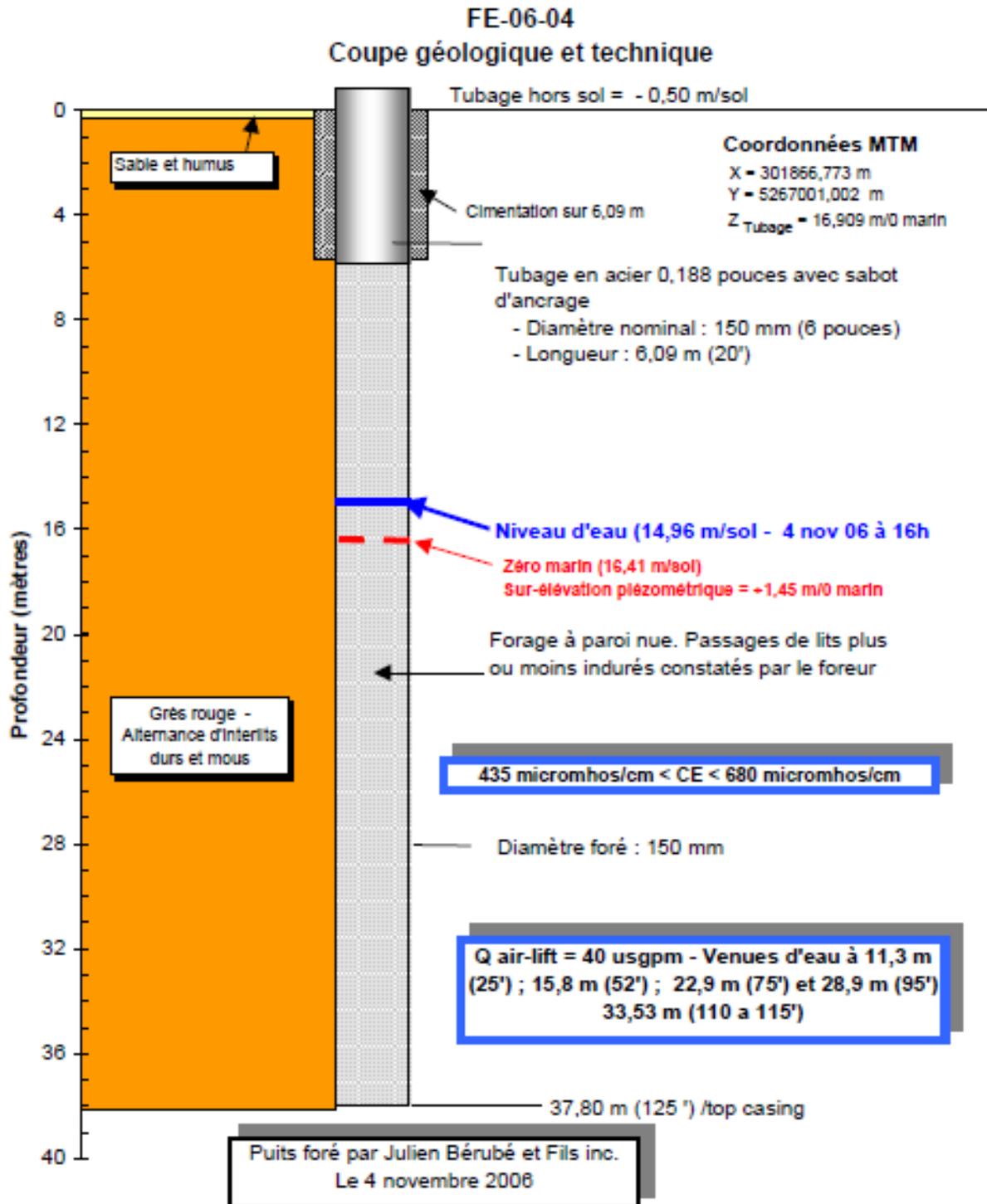


Figure A.20 : Schéma d'aménagement du puits FE-06-04, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2007)

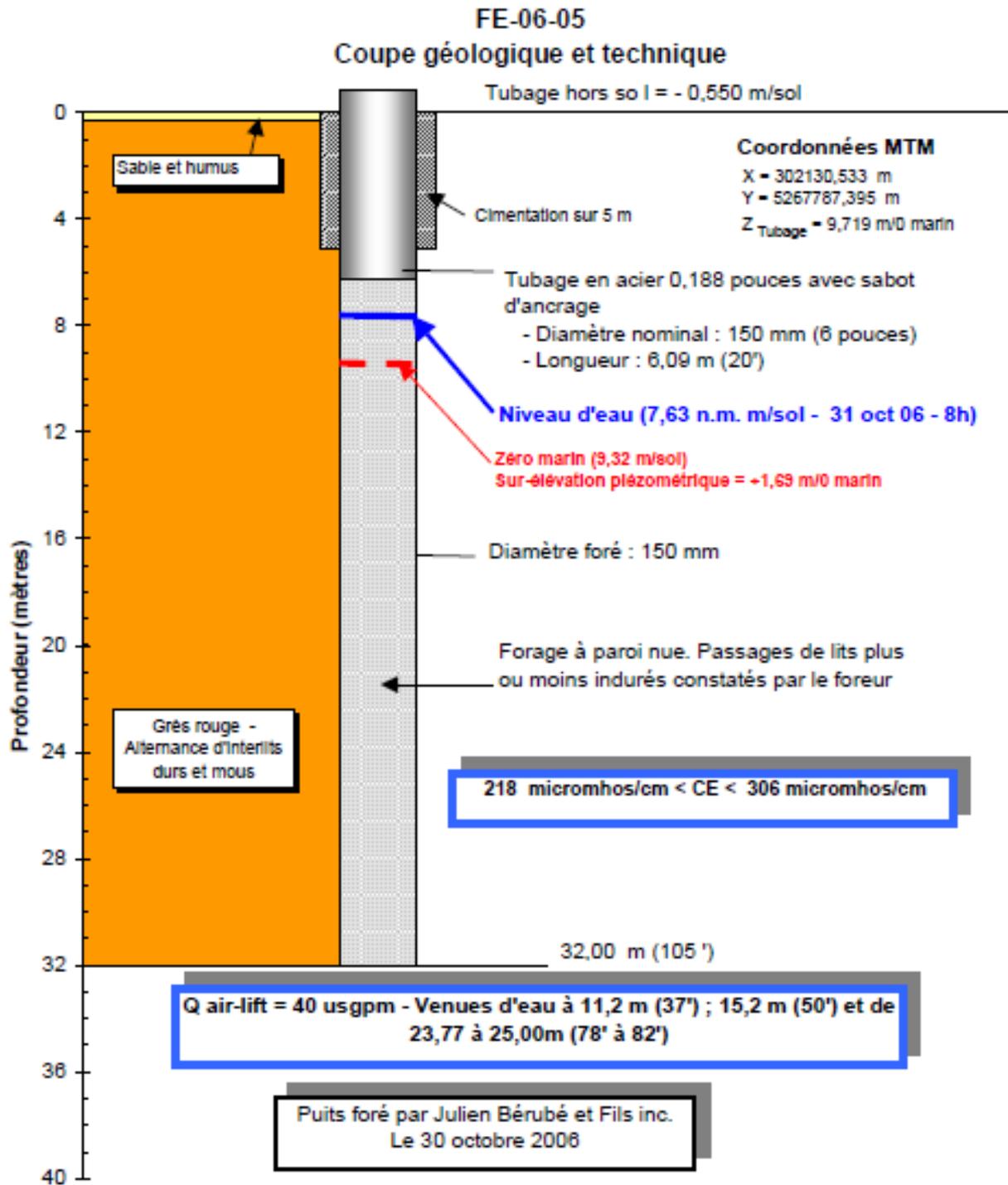


Figure A.21 : Schéma d'aménagement du puits FE-06-05, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2007)

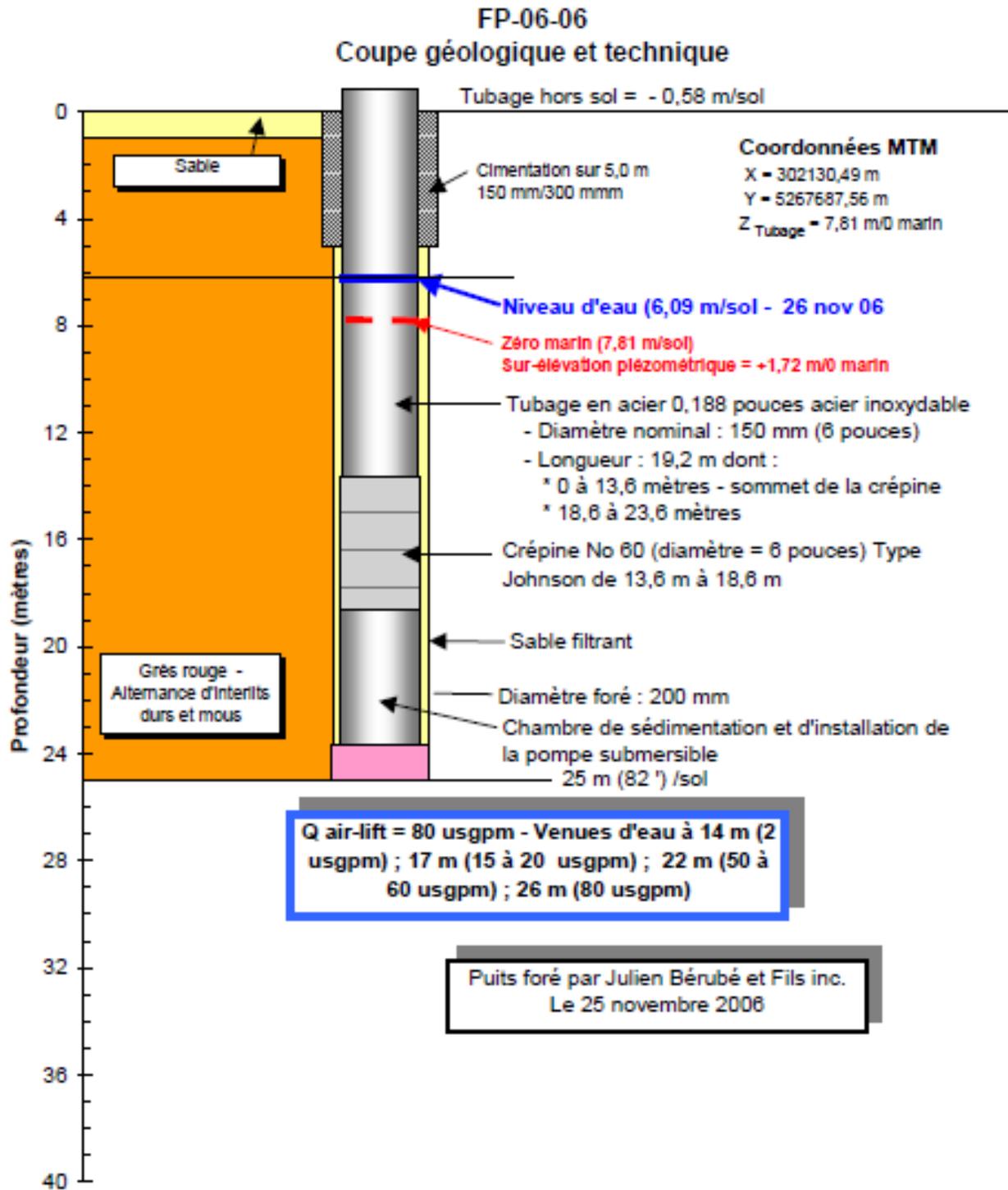


Figure A.22 : Schéma d'aménagement du puits FE-06-06, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2007)

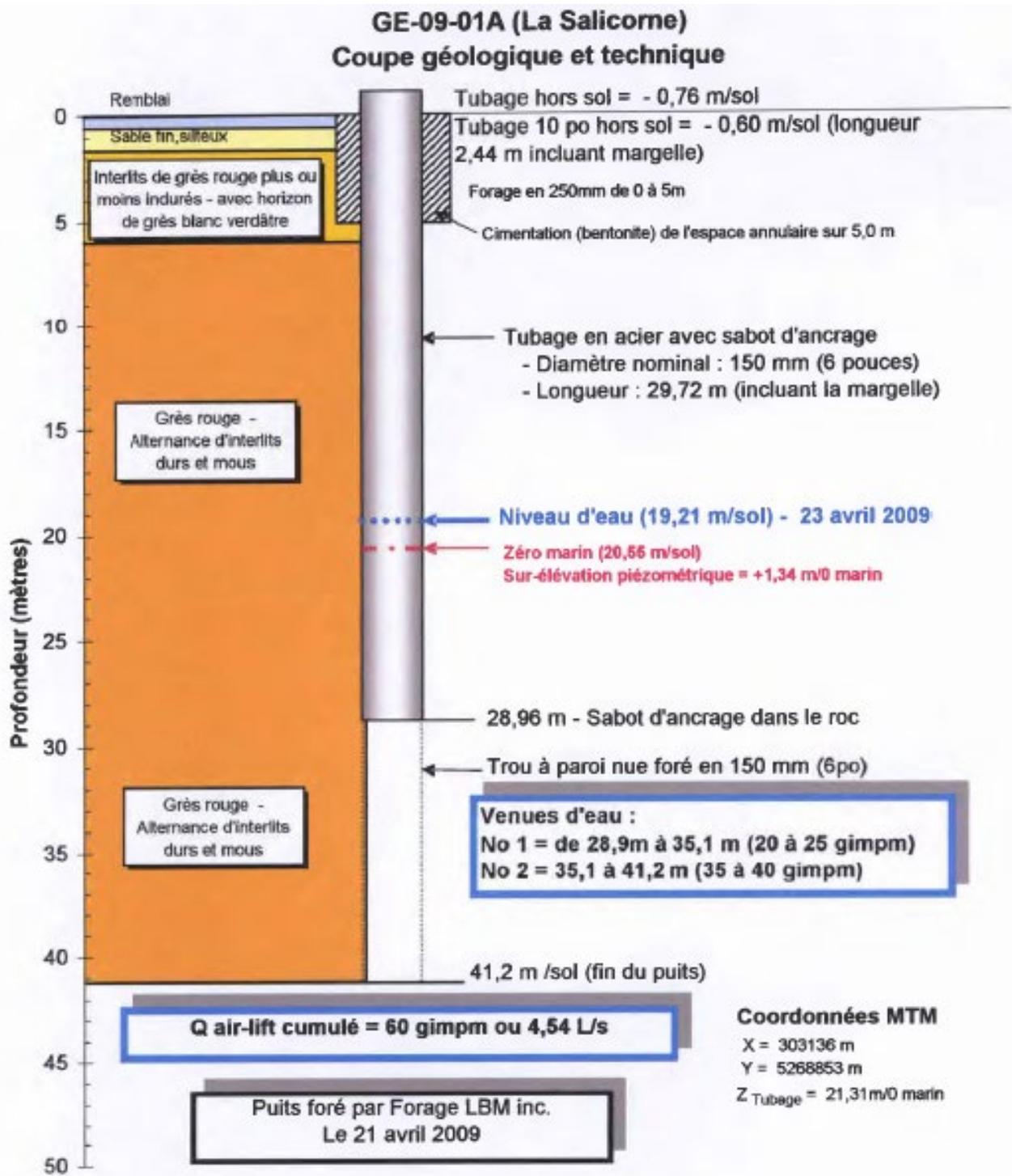


Figure A.23 : Schéma d'aménagement du puits GE-09-01A, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2009)

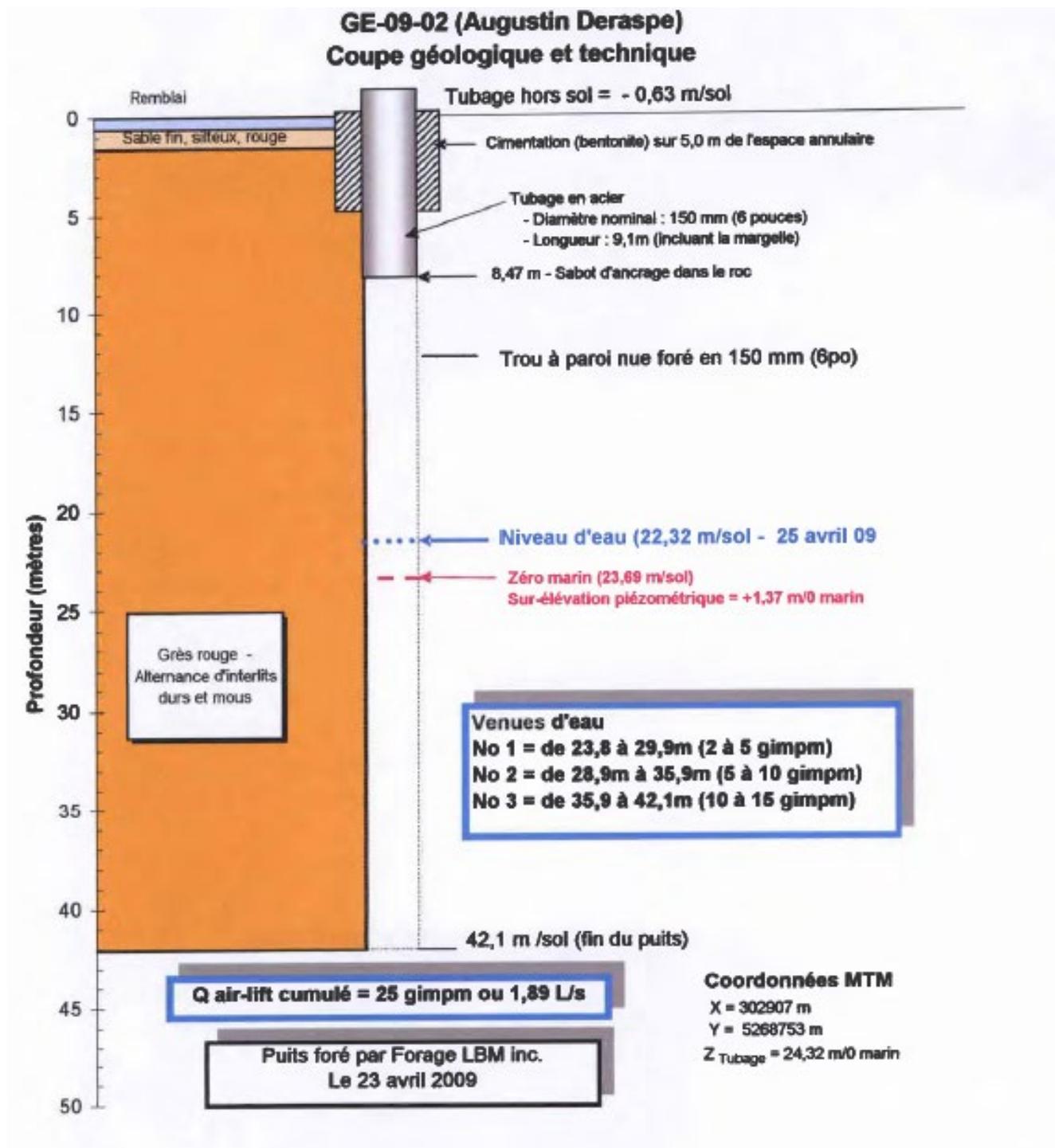


Figure A.24 : Schéma d'aménagement du puits GE-09-02, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2009)

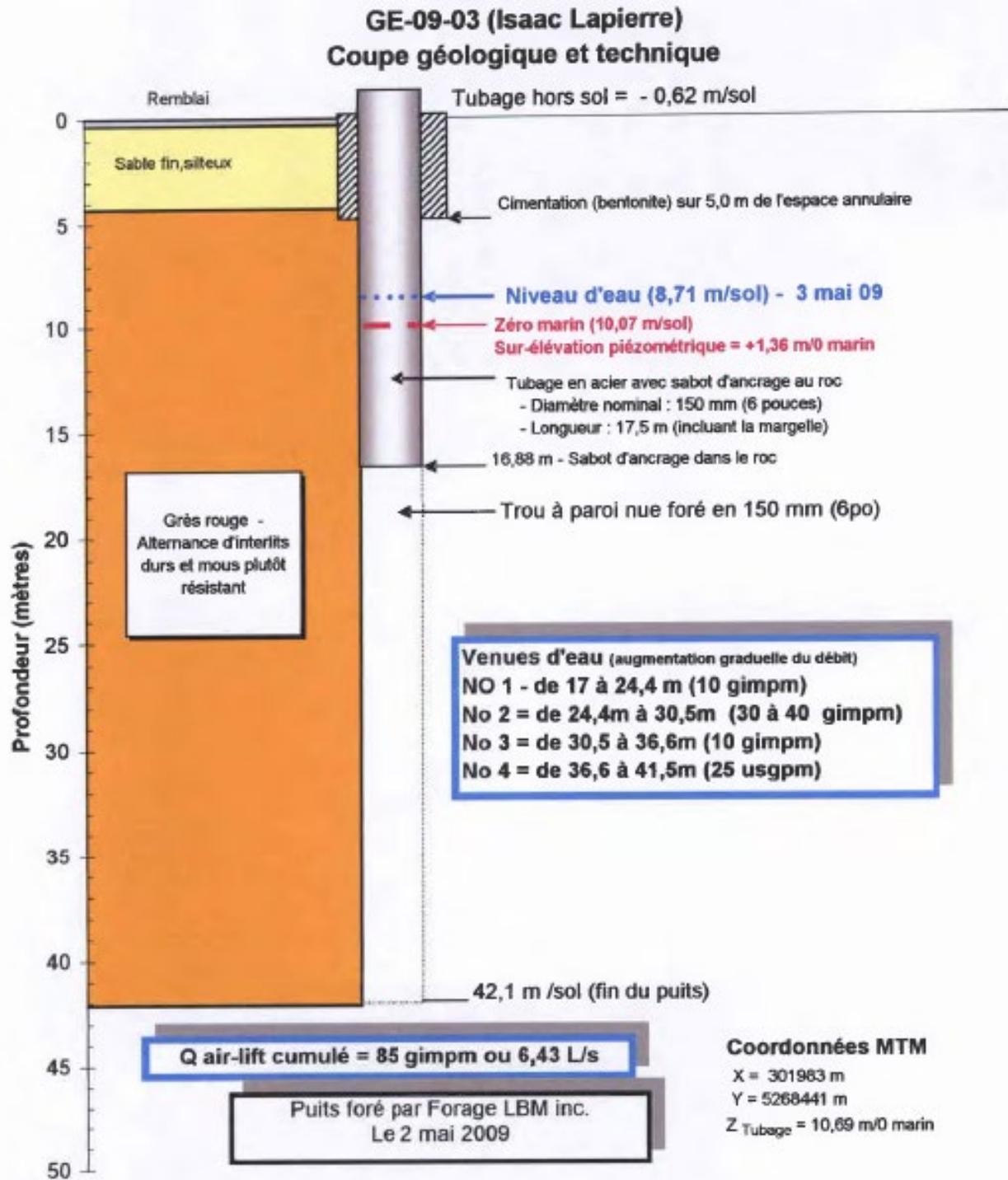


Figure A.25 : Schéma d'aménagement du puits GE-09-03, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2009)

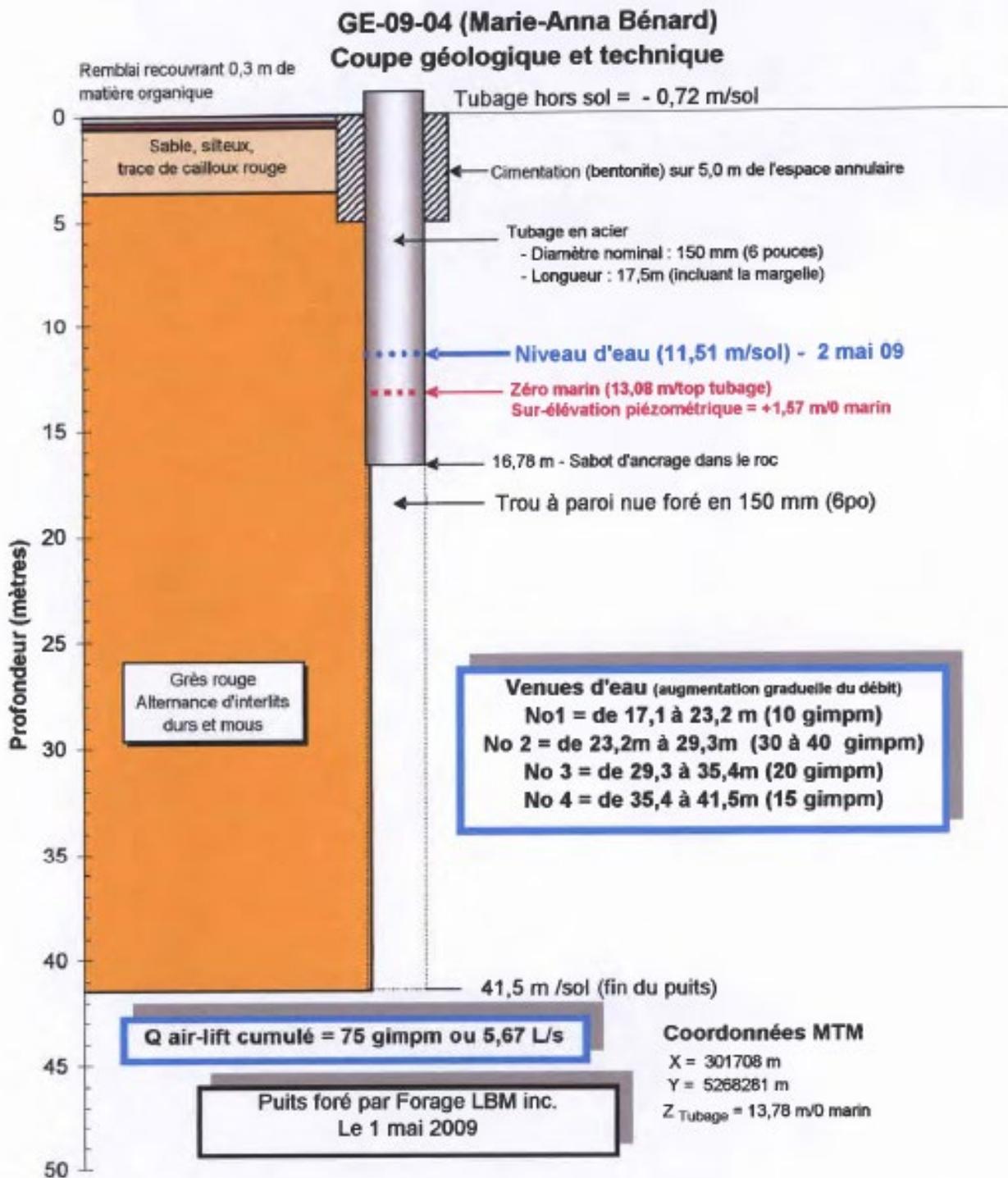


Figure A.26 : Schéma d'aménagement du puits GE-09-04, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2009)

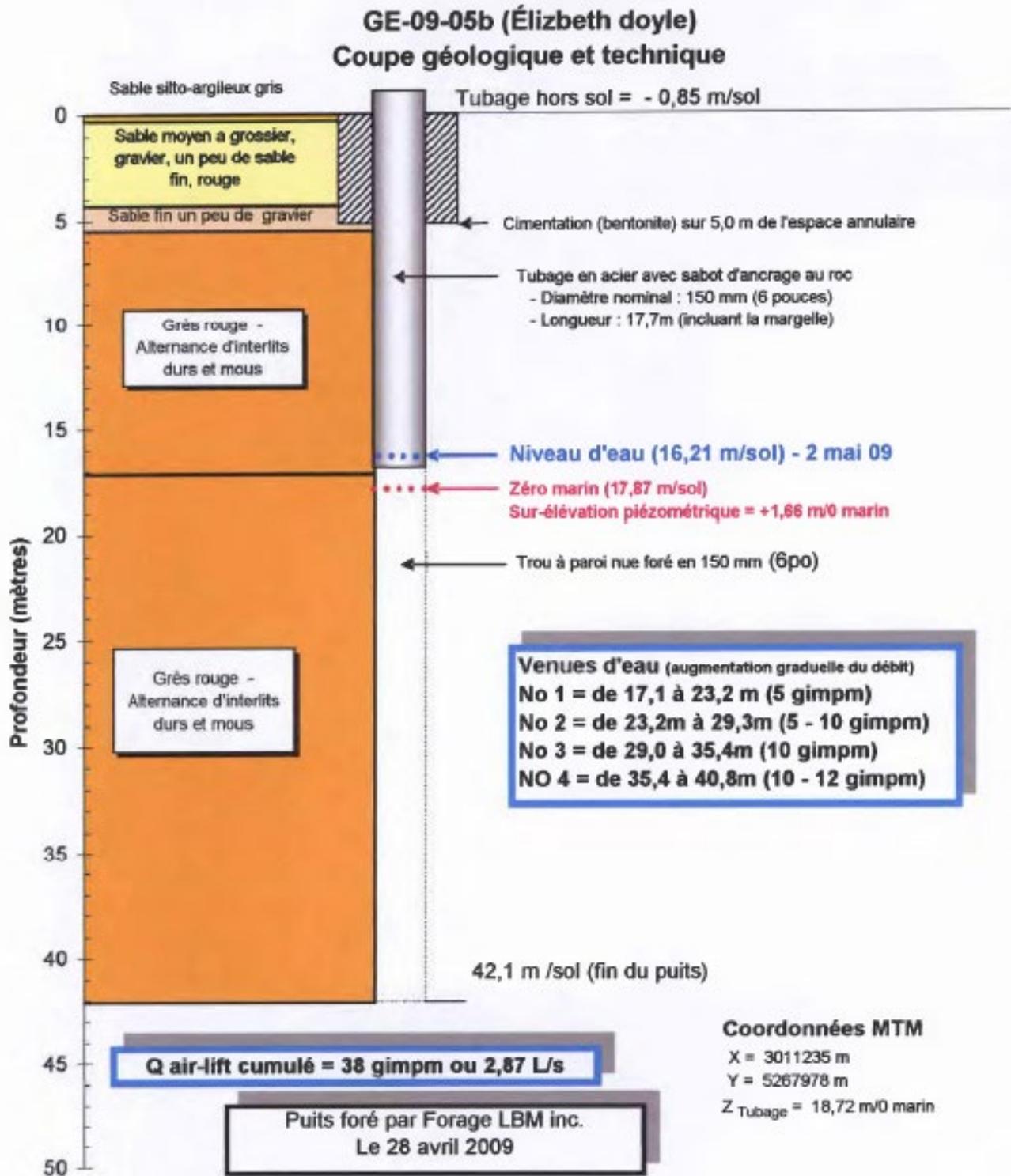


Figure A.27 : Schéma d'aménagement du puits GE-09-05B, île de la Grande Entrée (Groupe Madelin'Eau, 2009)

**Tableau A.5 : Description de la séquence stratigraphique des puits municipaux de l'île de la Grande Entrée**

Nom du puits	Profondeur de (m)	Profondeur à (m)	Description stratigraphique
FE-06-03	0,00	0,30	Sable et humus
	0,30	32,00	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
FE-06-04	0,00	0,30	Sable et humus
	0,30	37,80	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
FE-06-05	0,00	0,25	Sable et humus
	0,25	32,00	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
FP-06-06	0,00	1,00	Sable
	1,00	25,00	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
GE-09-01A	0,00	0,50	Remblai
	0,50	1,50	Sable fin silteux
	1,50	6,00	Interlits de grès rouge plus ou moins induré avec horizon de grès blanc verdâtre
	6,00	41,20	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
GE-09-02	0,00	0,50	Remblai
	0,50	1,50	Sable fin silteux, rouge
	1,50	42,10	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
GE-09-03	0,00	0,20	Remblai
	0,20	4,20	Sable fin silteux
	4,20	42,10	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous plutôt résistants
GE-09-04	0,00	0,40	Remblai
	0,40	0,70	Matière organique
	0,70	3,50	Sable silteux, traces de cailloux rouges
	3,50	41,50	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous
GE-09-05B	0,00	0,20	Sable silto-argileux gris
	0,20	4,20	Sable moyen à grossier, gravier, un peu de sable fin, rouge
	4,20	5,50	Sable fin, un peu de gravier
	5,50	42,10	Grès rouge - Alternance d'interlits durs et mous

Île d'Entrée

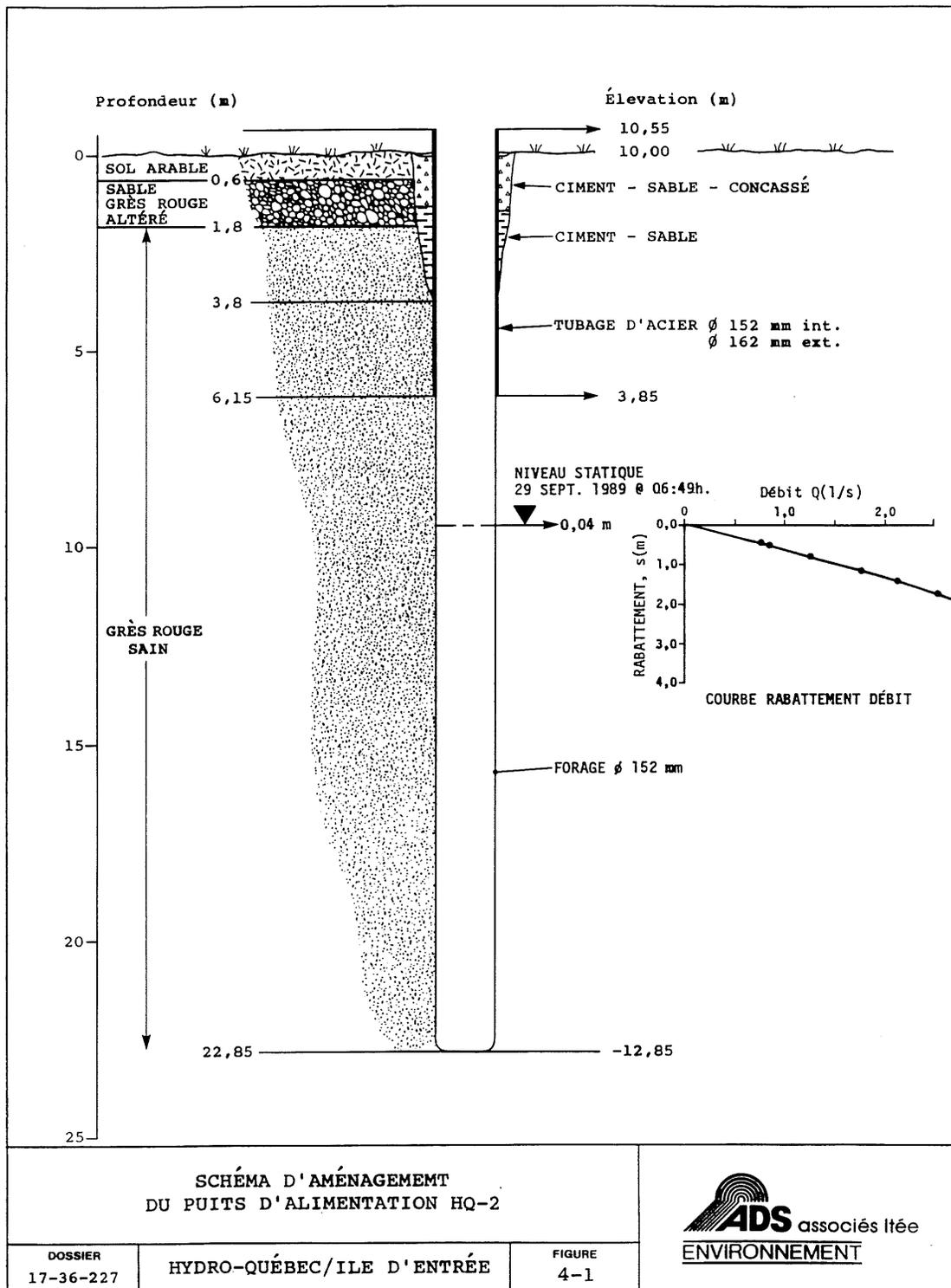


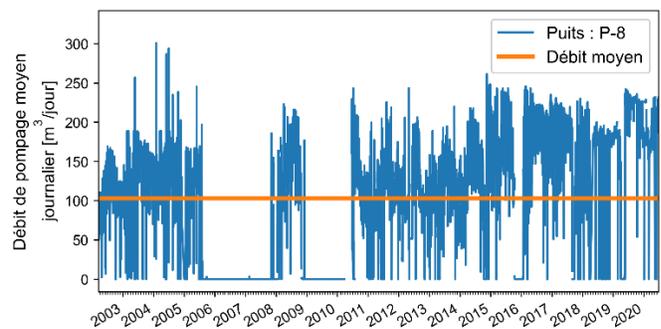
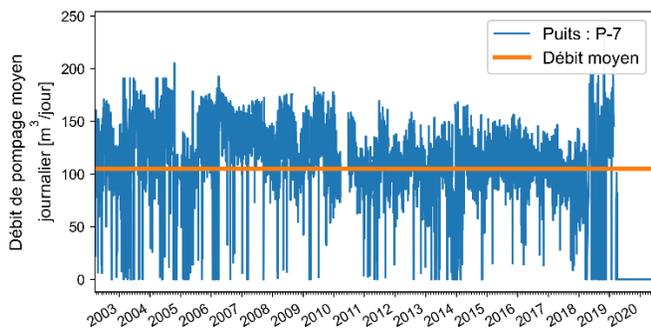
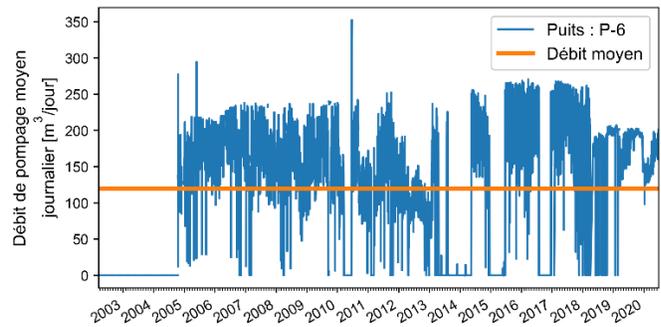
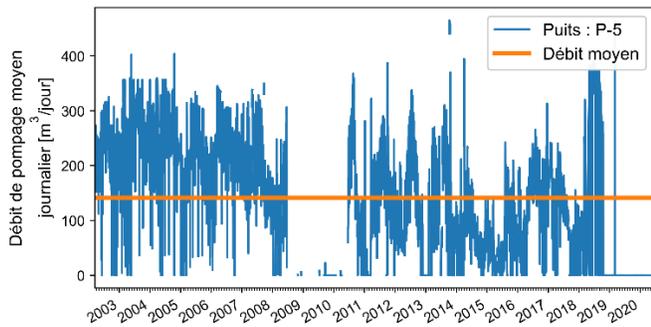
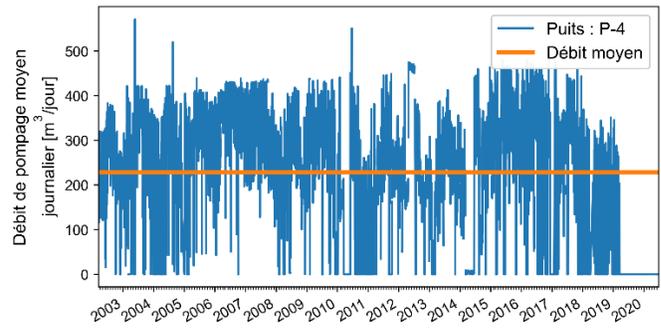
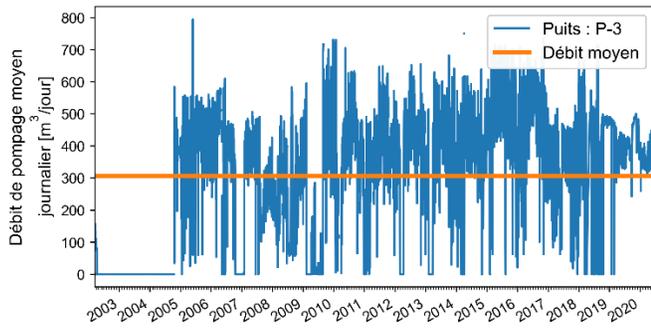
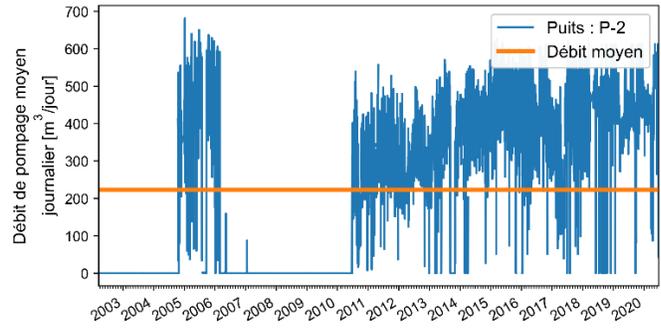
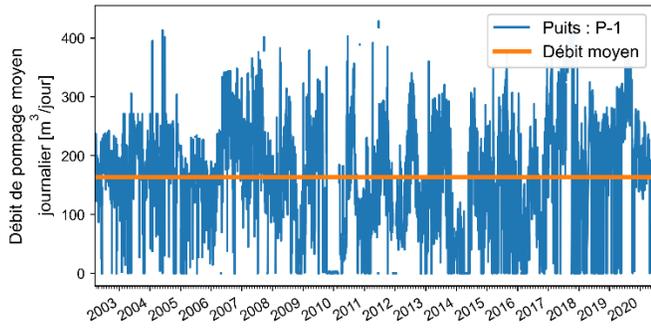
Figure A.28 : Schéma d'aménagement du puits HQ-2, île d'Entrée (ADS associés Ltée, 1989)

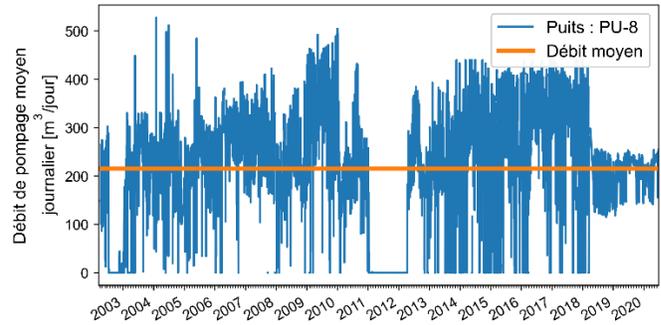
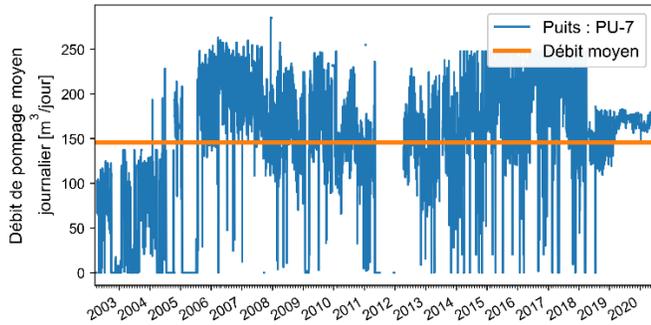
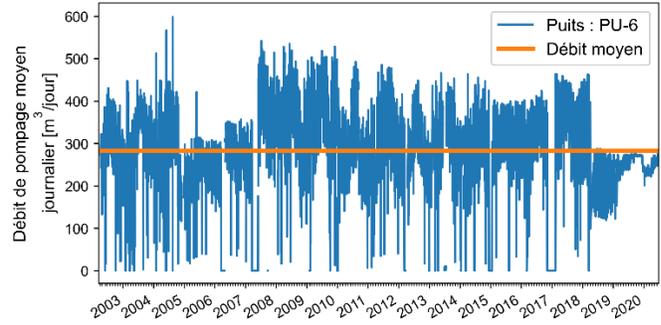
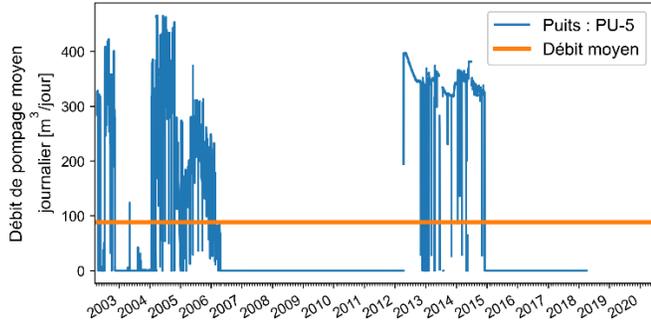
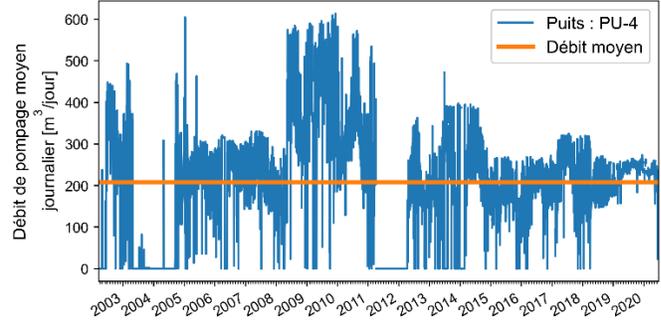
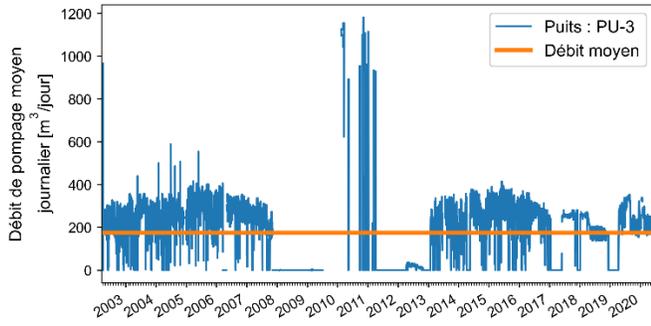
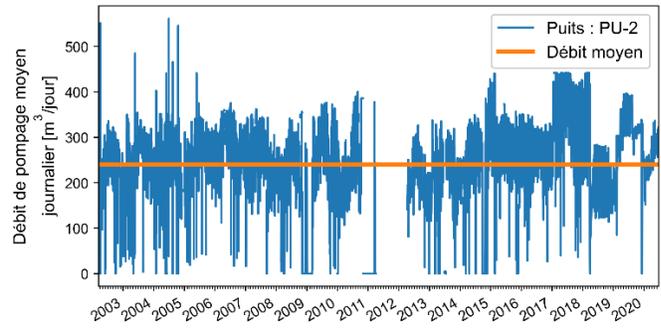
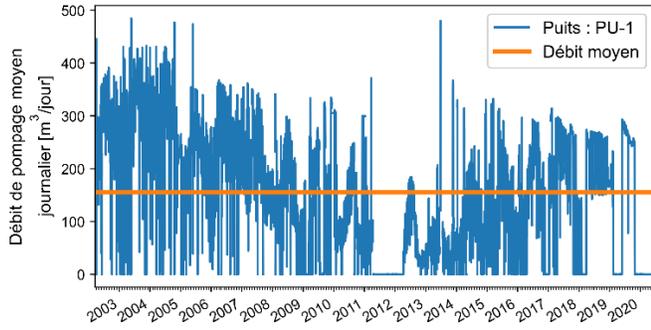
**Tableau A.6 : Description de la séquence stratigraphique du puits municipal de l'île d'Entrée**

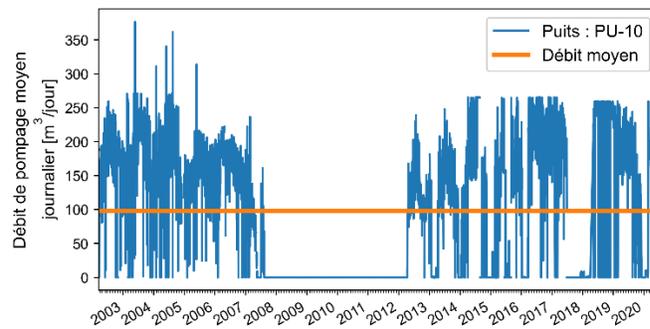
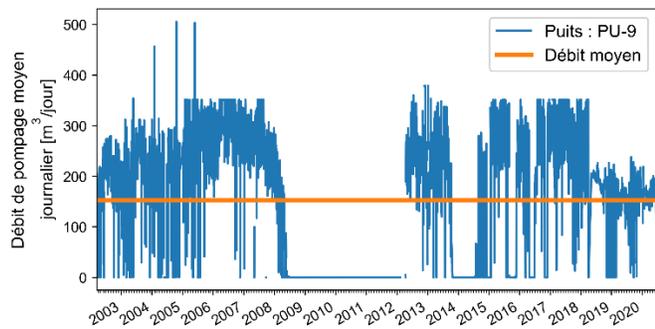
<b>Nom du puits</b>	<b>Profondeur de (m)</b>	<b>Profondeur à (m)</b>	<b>Description stratigraphique</b>
HQ-2	0,00	0,60	Terre végétale
	0,60	1,80	Sable et grès rouge altéré
	1,80	22,55	Grès rouge

**Annexe 2 : Chroniques journalières reconstituées des débits d'exploitation des puits d'approvisionnement municipaux**

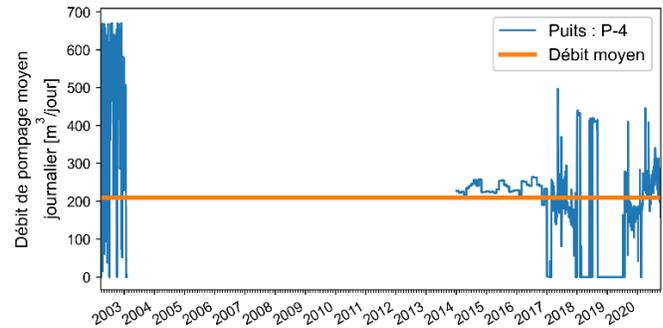
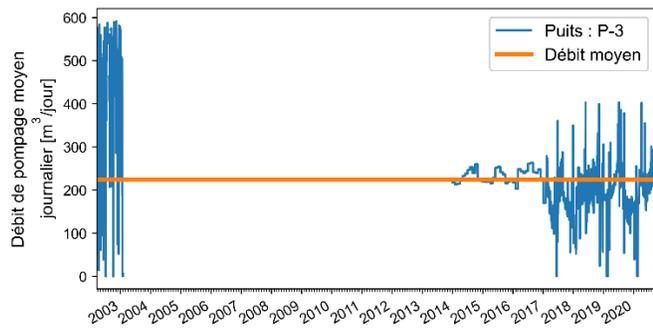
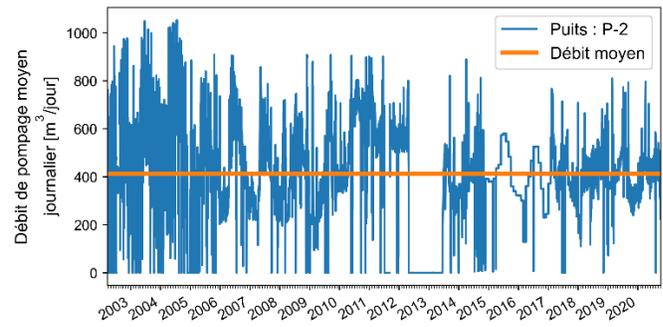
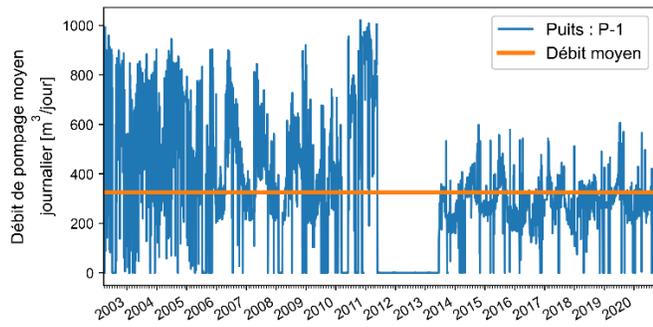
### Île du Cap aux Meules



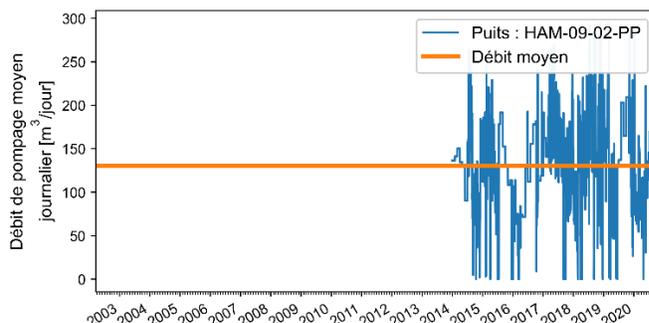
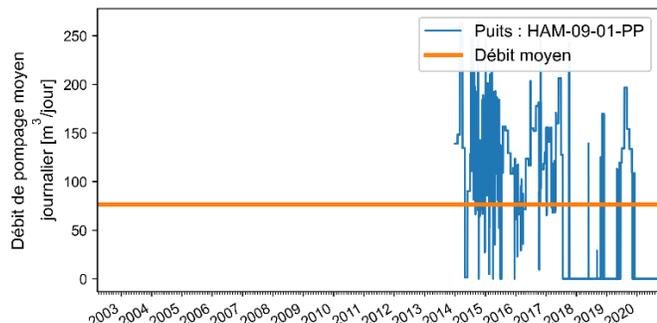
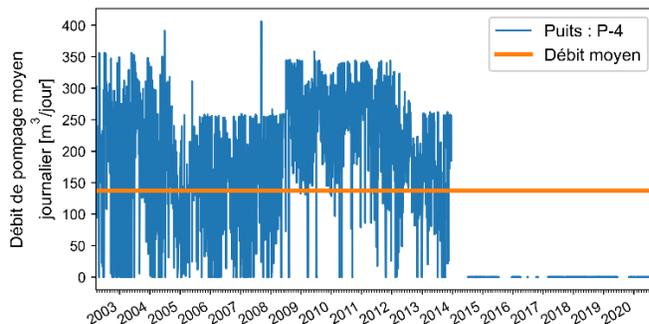
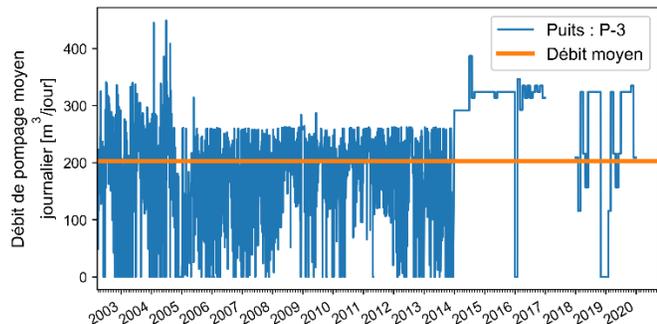
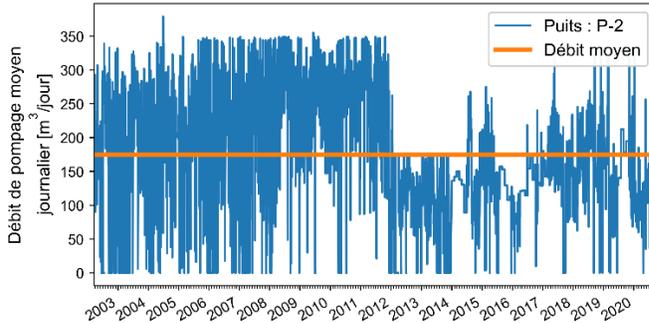
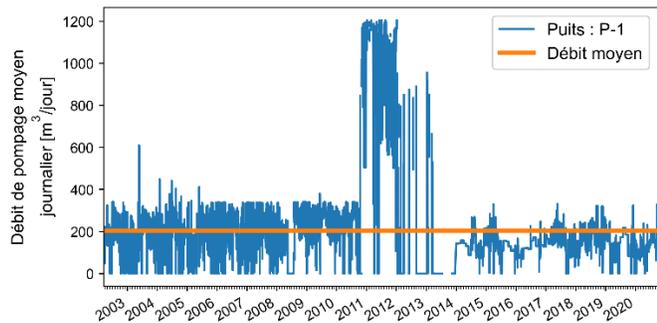




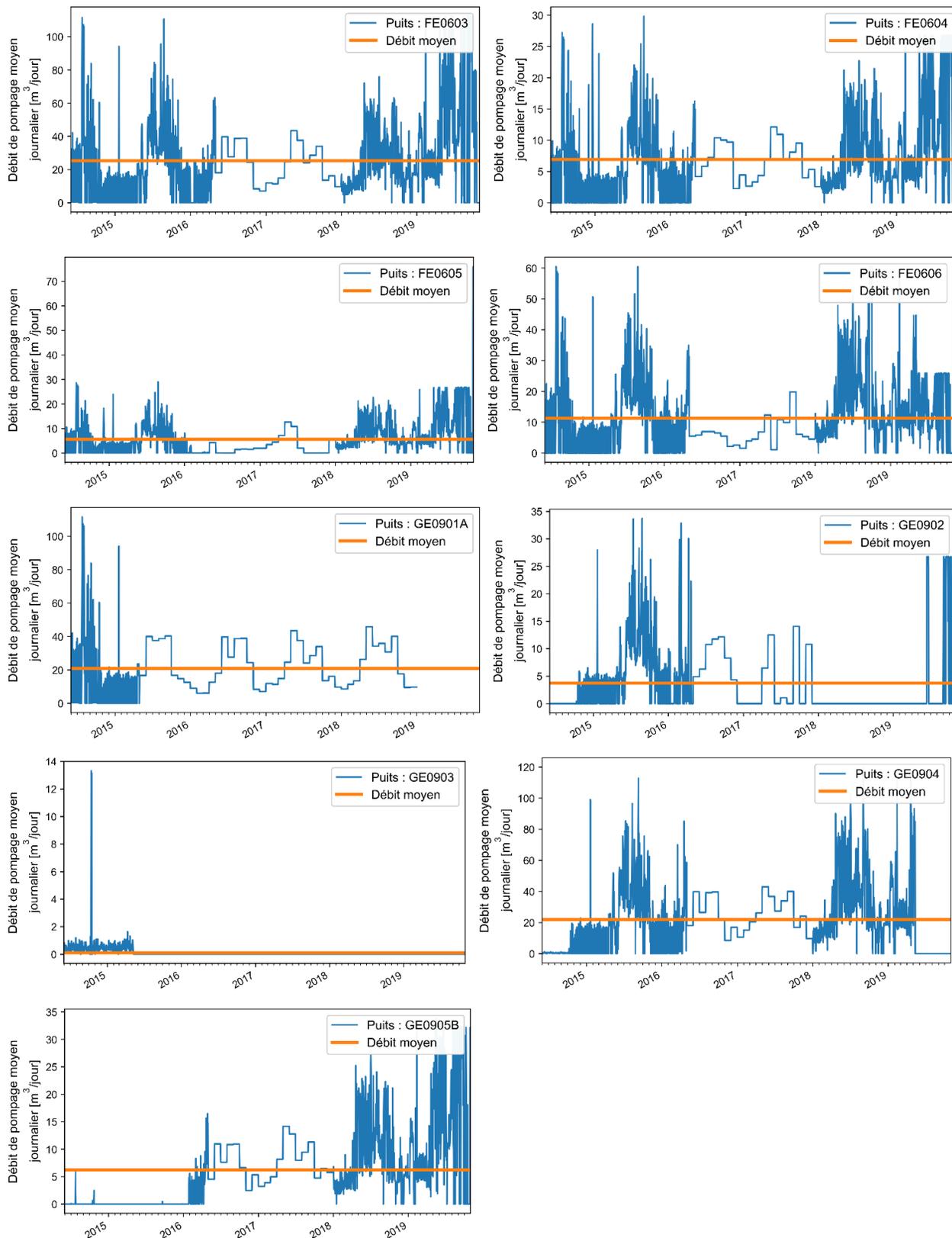
**Île du Havre Aubert**



### Île du Havre aux Maisons



### Île de la Grande Entrée



### **Annexe 3 : Méthodologie pour l'évaluation de l'usage de l'eau**

### **Estimation de la consommation d'eau actuelle**

La présente annexe détaille la méthodologie appliquée pour l'évaluation de l'usage de l'eau aux îles de la Madeleine, afin de tenir compte des particularités régionales du territoire. Il est à noter qu'aux îles de la Madeleine, l'ensemble de l'eau prélevée provient de sources souterraines et donc, aucun calcul pour l'eau de surface n'a été effectué. La méthodologie est largement inspirée du protocole des PACES intitulé *Protocole pour la préparation du livrable 26 – Utilisation de l'eau* (Ballard et coll., 2012).

### **Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins résidentielles**

#### *Résidents permanents*

Comme mentionné à la Section 2.4.1, l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) estime, pour 2020, une population de 12 301 résidents permanents pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et 473 habitants pour la Municipalité de Grosse-Île (ISQ, 2021b). Ainsi, le nombre d'habitants par île n'est pas connu, à l'exception de la Grosse Île, où le nombre d'habitants correspond à celui de la municipalité de Grosse Île. Il faut toutefois noter que cette municipalité inclut le village de Old Harry, qui lui est situé sur l'île de la Grande Entrée.

Pour les autres îles, des calculs ont été réalisés afin de déterminer le nombre d'habitants, qu'ils soient alimentés par un système d'aqueduc municipal ou non. Les informations de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine concernant l'inventaire des installations septiques autonomes de 2015 et 2016 ont été utilisées (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016). Dans l'inventaire, il est possible de trier les données par type d'aménagement (commercial, industriel, résidentiel, etc.). Les données uniquement de type résidentiel ont été conservées afin de dénombrer le nombre d'installations septiques domestiques par île. Par la suite, ce nombre a été multiplié par le nombre moyen de personnes par ménage privé pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, soit 2,2 (Statistique Canada, 2017). Les résultats sont présentés au Tableau A.7.

**Tableau A.7 : Nombre d'installations septiques résidentielles et nombre d'habitants estimés pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine**

Île	Nombre d'installation décrite comme résidentielle	Nombre de résidents calculés (x 2,2 pers./habitation)
Île d'Entrée	76	167
Havre Aubert	1 097	2 413
Cap aux Meules	3 244	7 137
Havre aux Maisons	879	1 934
Île aux Loups	80	176
Grande Entrée	261	574
<b>Total Municipalité des Îles-de-la-Madeleine</b>	<b>5 637</b>	<b>12 401</b>

La population totale estimée de 12 401 personnes pour la Municipalité des Îles-de la Madeleine est très semblable à la population officielle de l'ISQ, de 12 301. Ces estimations ont donc été utilisées avec confiance pour le calcul de l'utilisation de l'eau résidentielle, à l'exception de l'île d'Entrée. En effet, le nombre d'habitants calculé est jugé trop élevé et une valeur plus réaliste de 60 habitants a été fixée.

Le nombre de personnes desservies par les réseaux d'aqueduc est fourni par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine par système de distribution et comprend au total 11 354 personnes (Tableau 3.1). Afin de connaître la population approvisionnée en eau potable par des puits privés, le nombre d'habitants desservis par les systèmes d'aqueduc a été soustrait du nombre total d'habitants (Tableau A.7). Il est à noter que l'île aux Loups et la Grosse Île ne possèdent pas de système d'aqueduc sur leur territoire.

Le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC (2015) estime que la consommation résidentielle moyenne québécoise en eau est de 250 L/personne/jour. Cette valeur a été utilisée pour calculer le volume d'eau utilisé annuellement, en le multipliant avec le nombre de résidents sur chaque île.

**Tableau A.8 : Nombre d'habitants par île desservi ou non par un système d'aqueduc et estimation du volume d'eau consommé par an**

Île	Nombre d'habitants desservis		Estimation de l'eau consommée (m <sup>3</sup> /an)	
	Par aqueduc	Par puits privé	Par aqueduc	Par puits privé
Île d'Entrée	35	25	3 194	2 281
Havre Aubert	2 248	165	205 130	15 056
Cap aux Meules	6 643	494	606 174	45 078
Havre aux Maisons	1 921	13	175 291	1 186
Île aux Loups	0	176	0	16 060
Grande Entrée	507	67	46 264	6 114
Grosse Île	0	473	0	43 161
<b>Total</b>	<b>11 354</b>	<b>1 413</b>	<b>1 036 053</b>	<b>128 936</b>

#### *Résidents non permanents*

Les résidents non permanents sont les personnes possédant une résidence aux îles de la Madeleine, mais qui n'y résident que quelques semaines ou mois par année, ainsi que les touristes. Comme ces résidents non permanents, principalement les touristes, sont très nombreux aux îles de la Madeleine, ils viennent influencer la consommation d'eau potable, principalement durant la saison estivale de mai à octobre. En 2018, on dénombre un total de 77 700 visiteurs, dont la majorité (60 000 visiteurs, 77 %) était présente durant la saison estivale de juin à septembre (Tourisme Îles de la Madeleine, 2019). Dans ce dénombrement, aucune distinction n'est faite entre les touristes et les propriétaires de résidences secondaires. Les visiteurs restent en moyenne pour 9 nuitées, donc 10 jours (Tourisme Îles de la Madeleine, 2017). Leur consommation en eau est estimée comme étant similaire à la consommation résidentielle, soit de 250L/personne/jour.

D'après la révision du plan directeur de gestion de l'eau potable (BPR, 2011), la répartition touristique était de 50 % pour l'île du Cap aux Meules, 25 % pour l'île du Havre Aubert, 20 % pour l'île du Havre aux Maisons et un dernier 5 % réparti pour les îles restantes (Île d'Entrée, île de la Grande Entrée et Grosse Île). Ce 5 % de visiteurs restants a été distribué sur les différentes îles en utilisant des valeurs approximées avec la planificatrice-coordonnatrice des services techniques et réseaux publics ainsi que du coordonnateur de la géomatique, des terres publiques et de l'environnement de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Afin de savoir si les touristes s'approvisionnent via un système d'aqueduc ou un puits privé, les mêmes proportions que les habitants permanents ont été utilisées, à l'exception de l'île

de la Grande Entrée, où il a été supposé que 100 % des touristes s'alimentent en eau via l'aqueduc. En effet, les infrastructures touristiques sur cette île sont toutes raccordées au système d'aqueduc. Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau A.9.

**Tableau A.9 : Répartition des résidents non permanents aux îles de la Madeleine**

Île	Répartition des résidents non permanents par île (%)	Nombre de résidents non permanents (par an)	Nombre de résidents non permanents desservis		Estimation de l'eau consommée (m <sup>3</sup> /an)	
			Par aqueduc	Par puits privé	Par aqueduc	Par puits privé
Île d'Entrée	0,5	389	81	307	567	405
Havre Aubert	25	19 425	18 097	1 328	45 242	3 321
Cap aux Meules	50	38 850	36 161	2 689	90 402	6 723
Havre aux Maisons	20	15 540	15 436	104	38 589	261
Île aux Loups	0,5	389	0	389	0	971
Grande Entrée	3	2 331	2 331	0	5 828	0
Grosse Île	1	777	0	777	0	1 943
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>77 700</b>	<b>72 106</b>	<b>5 594</b>	<b>180 627</b>	<b>13 623</b>

#### **Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins agricoles**

Afin d'estimer la consommation en eau du secteur agricole aux îles de la Madeleine, la superficie des terres agricoles et leur utilisation ont été obtenues d'un inventaire effectué par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine en 2020. L'information de cet inventaire provient majoritairement du MAPAQ et de l'organisme Le Bon goût frais des Îles, ainsi que des contacts directs avec les producteurs afin d'améliorer la connaissance des sols cultivés. D'autre part, des visites de terrain ont été réalisées et les orthophotographies de mai 2019 ont été utilisées pour l'interprétation des superficies exploitées. Finalement, la base de données de la matrice graphique des municipalités des Îles-de-la-Madeleine et de Grosse-Île a été utilisée pour la compilation des résultats selon l'utilisation du territoire, le type de culture et les propriétaires et usagers des terrains.

Différents types d'activité pour les zones agricoles sont identifiées dans l'inventaire. Afin de déterminer l'utilisation en eau de chaque activité, les valeurs fournies par BPR (2003), tel que suggéré par le *Protocole pour la préparation du livrable 26 – Utilisation de l'eau* (Ballard et coll., 2012), ont été utilisées et sont identifiées dans le Tableau A.10. Pour le poulailler, comme il s'agissait d'un seul éleveur, il a été possible de trouver de quel poulailler il s'agissait, soit un poulailler de poules pondeuses, comptant entre 5000 et 9999 têtes (Fédération des producteurs d'œufs du Québec, 2022). Il en va de même pour la ferme identifiée dans l'inventaire, qui compte deux vaches et quelques poules. Pour ce qui est des cultures agricoles, les activités de tourbe, de céréales et de foin, il a été supposé que les champs n'étaient pas irrigués, mais laissés aux conditions météorologiques. Les activités maraîchères et le vignoble ont été classifiés comme une activité d'irrigation, avec des besoins de 1 500 m<sup>3</sup>/ha/an. Finalement, les activités maraîchères en serre ont un besoin en eau estimé à 9 308 m<sup>3</sup>/ha/an.

**Tableau A.10 : Besoins en eau selon le type de culture**

<b>Culture</b>	<b>Besoin en eau (m<sup>3</sup>/ha/an)</b>
Foin	0
Maraîcher	1 500
Céréales	0
Maraîcher serre	9 308
Pâturage	0
Tourbe - pelouse	0
Vignoble	1 500

Pour les activités de pâturage, des recherches pour chacun des terrains ont été effectuées afin de déterminer la présence ou non d'animaux. En effet, comme le nom des propriétaires et l'emplacement des terrains étaient connus, et qu'ils sont peu nombreux aux îles de la Madeleine, il était possible de faire des recherches aussi pointues. Quatre terrains ont donc été identifiés de cette manière et leur consommation en eau a été déterminée en fonction du nombre d'animaux présents (Tableau A.11). Pour les autres activités de pâturage, il a été supposé que la consommation en eau est nulle.

**Tableau A.11 : Besoins en eau par secteur d'activité relié aux productions animales au Québec (tiré de BPR, 2003)**

Secteur d'activité	Cheptel (tête)	Besoins en eau d'abreuvement		Autres besoins en eau		Consommation totale (m <sup>3</sup> /an)
		Unitaires (L/j/tête)	Totaux (m <sup>3</sup> /an)	Unitaires (L/j/tête)	Totaux (m <sup>3</sup> /an)	
<b>Ovin</b>	<b>254 053</b>		<b>891 228</b>		<b>127 025</b>	<b>1 018 253</b>
Béliers	5 393	10	19 684	-	-	19 684
Brebis	149 305	12	653 956	1	54 496	708 452
Agneaux	99 355	6	217 587	2	72 529	290 117
<b>Bovin</b>	<b>1 362 788</b>		<b>28 134 609</b>		<b>3 170 230</b>	<b>31 304 839</b>
Vaches laitières	407 206	110	16 349 321	17	2 541 576	18 890 897
Vaches de boucherie	207 852	68,8	5 219 579	6	479 473	5 699 052
Veaux de moins d'un an	417 402	17,3	2 635 685	-	-	2 635 685
Génisses et taures, 1 an et plus	234 959	29,3	2 512 769	-	-	2 512 769
Bouvillons, 1 an et plus	81 743	40	1 193 448	5	149 181	1 342 629
Taureaux, 1 an et plus	13 626	45	223 807	-	-	223 807
<b>Porcin</b>	<b>4 267 365</b>		<b>12 041 347</b>		<b>8 284 583</b>	<b>20 325 929</b>
Verrats	8 504	15	46 559	-	-	46 559
Truies et cochettes de reproduction	401 562	17	2 491 692	-	-	2 491 692
Porcs d'engraissement et porcs en finition	2 521 943	9	8 284 583	9	8 284 583	16 569 166
Porcelets non sevrés et porcelets sevrés	1 335 356	2,5	1 218 512	-	-	1 218 512
<b>Avicole</b>	<b>33 576 806</b>		<b>2 190 709</b>		<b>490 266</b>	<b>2 680 975</b>
Poulets à griller, à rôti et de Cornouailles	22 575 068	0,16	1 318 384	0,04	329 596	1 647 980
Poulettes de 19 semaines et moins	2 299 377	0,15	125 891	0,04	33 571	159 462
Poules pondeuses de 19 semaines et plus	4 337 784	0,25	395 823	0,04	63 332	459 154
Dindons et dindes	1 747 067	0,4	255 072	0,1	63 768	318 840
Autres volailles	2 617 510	0,1	95 539	-	-	95 539
<b>Autres</b>	<b>241 184</b>		<b>596 147</b>		<b>110 514</b>	<b>706 661</b>
Chevaux et poneys	22 284	45	366 015	5	40 668	406 683
Chèvres	27 337	8	79 824	7	69 846	149 670
Bisons	4 192	35	53 553	-	-	53 553
Chevreuils	15 813	8	46 174	-	-	46 174
Lamas et alpagas	348	8,9	1 130	-	-	1 130
Lapins	96 213	0,22	7 726	-	-	7 726
Renards	2 319	1	846	-	-	846
Sangliers	2 908	8	8 491	-	-	8 491
Visons	67 025	0,3	7 339	-	-	7 339
Élans (wapitis)	2 745	25	25 048	-	-	25 048
<b>TOTAL</b>			<b>43 854 039</b>		<b>12 182 619</b>	<b>56 036 659</b>

Il a été noté que l'ensemble des terres agricoles est alimenté en eau par des puits privés, à l'exception de certains terrains qui ont été identifiés comme alimentés par les réseaux municipaux de distribution (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, communication personnelle, 2021). Une fois les besoins en eau établis selon le type de culture, les estimations ont été calculées par île. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau A.12. À noter que pour l'île d'Entrée, l'île aux Loups et la Grosse Île, les activités agricoles sont très limitées et aucune consommation en eau de ce secteur n'a été estimée.

**Tableau A.12 : Estimation des besoins en eau (m<sup>3</sup>/an) pour le secteur agricole par île**

Île	Par aqueducs			Par puits privés		
	Culture	Élevage	Total	Culture	Élevage	Total
Havre Aubert	10 034	164	10 198	4 836	0	4 836
Cap aux Meules	4 593	1 058	5 651	1 202	2 252	3 454
Havre aux Maisons	0	3 616	3 616	0	0	0
Grande Entrée	0	94	94	0	0	0

***Méthode de calcul des volumes d'eau prélevés à des fins industrielles, commerciales et institutionnelles (ICI)***

Dans un premier temps, afin d'évaluer l'utilisation en eau des industries, commerces et institutions, les données des compteurs d'eau, installés chez les grands préleveurs connectés aux réseaux d'aqueduc de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, ont été utilisées. Il est important de noter que l'installation de compteurs d'eau n'est pas complétée et que certaines activités industrielles ou commerciales ne sont pas prises en compte dans ce calcul. Les résultats obtenus selon cette méthode sous-estiment donc la réalité. Parmi les compteurs installés à ce jour, on en retrouve un à l'île de la Grande Entrée, un à l'île du Havre aux Maisons et 23 à l'île du Cap aux Meules (aucun à l'île du Havre Aubert). Pour chaque compteur, une moyenne annuelle de la consommation sur 2014-2019 a été effectuée. La somme obtenue des 23 compteurs de l'île du Cap aux Meules, soit environ 226 000 m<sup>3</sup>/an, est presque identique à la valeur présentée dans la révision du plan directeur de gestion de l'eau potable (BPR, 2011) pour la consommation des usagers majeurs sur cette île. Il a été établi que les estimations de consommation des ICI de BPR (2011) sont encore d'actualité et elles ont été utilisées pour l'île du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons pour la consommation via les réseaux d'aqueduc. Pour l'île du Havre Aubert, les estimations de BPR (2011) ont aussi été utilisées, mais en retirant les valeurs d'une usine de transformation des produits de la mer et d'un camping qui n'existent plus à ce jour.

Il est à noter que ce ne sont pas toutes les écoles qui disposent d'un compteur d'eau. Dans les cas où un tel compteur était absent, la consommation de l'école était calculée avec le nombre d'étudiants par établissements et une moyenne de consommation de 60 L/personne/jour (Brière, 2000) (Tableau A.13) pour 185 jours d'école. Le nombre d'élèves de chaque établissement été déterminé selon les valeurs fournies par la Commission scolaire des Îles (CSdesiles, 2021). L'ensemble des résultats obtenus pour les différentes îles est présenté au Tableau A.14.

Pour l'île de la Grande Entrée, l'utilisation de l'eau de l'usine de transformation des produits de la mer de LA Renaissance des Îles était comptabilisée par un compteur. À cette valeur a été ajouté l'utilisation de l'auberge La Salicorne et de son camping, ainsi que l'école primaire. Ces bâtiments sont alimentés en eau par le réseau d'aqueduc. Pour estimer leur consommation par jour, les valeurs de Brière (2000) (Tableau A.13) ont été utilisées.

Pour l'île d'Entrée, comme l'école primaire a fermé dans les dernières années et qu'il n'y a pas d'industrie ou commerce majeur sur l'île, la consommation d'eau pour les ICI est considérée comme nulle. Il en va de même pour l'île aux Loups.

Finalement, pour l'île de la Grosse Île, l'école primaire et la mine Seleine ont été prises en compte. La consommation d'eau moyenne pour la mine Seleine a été obtenue d'une présentation de Mines Seleine lors de l'enquête du BAPE (2013), dans lequel une consommation de 17 m<sup>3</sup>/jour était estimée pour l'ensemble des six puits exploités par la mine.

**Tableau A.13 : Estimation de consommation d'eau pour différentes activités (Brière, 2000)**

Établissement - utilisations	Consommation [L/(personne·d) ou L/(unité·d)]
Aéroport (par passager)	8 - 12
Centres commerciaux	
Par stationnement	5
Par employé	40
Centres de vacances	
Campings rustiques (par vacancier)	100
Colonies de vacances; toilettes et bains centraux (par vacancier)	160 - 200
Centres de jour; sans repas (par vacancier)	65
Camps pour caravanes; toilettes et bains privés (par unité; 2,5 personnes)	500 - 600
Camps de travail (par travailleur)	140 - 200
Cinéma ou théâtre	
Deux représentations par jour (par siège)	10 - 15
Ciné-parc (par auto)	20
Écoles (par élève)	
Avec cafétéria	40 - 60
Avec cafétéria, douches et gymnase	60 - 80
Pensionnat	300
Édifices à bureaux (par employé)	60
Établissements de santé	
Hôpital général (par lit)	600
Hôpital général (par employé)	40
Hôtels et pensions	
Chambre d'hôtel (par client)	200 - 400
Chambre et pension (par pensionnaire)	200
Motel avec cuisine	400 - 600
Laverie (par machine à laver)	1000 - 3000
Magasins	
Par client	8
Par employé	40
Restaurants	
Restaurant moyen (par siège)	150
Restaurant moyen; ouvert 24 h (par siège)	200
Bar (par place)	38
Taverne (par place)	80
Stations-service	
Par automobile servie	40
Par paire de pompes	2000
Petites et moyennes entreprises (PME)	
Sans cafétéria ni douche (par employé)	70
Sans cafétéria; avec douches (par employé)	140

**Tableau A.14 : Estimation des besoins en eau (m<sup>3</sup>/an) industriel, commercial et institutionnel**

Île	Industriel et commercial		Établissement d'enseignement		Total ICI	
	Par aqueduc	Par puits privé	Par aqueduc	Par puits privé	Par aqueduc	Par puits privé
Île d'Entrée	0	0	0	0	0	0
Havre Aubert	2 829	0	1 369	0	4 198	0
Cap aux Meules	191 844	0	16 068	0	207 912	0
Havre aux Maisons	34 164	0	1 758	0	35 922	0
Île aux Loups	0	0	0	0	0	0
Grande Entrée	13 692	0	278	0	13 970	0
Grosse Île	0	6 307	0	1 055	0	7 362
<b>Total</b>	<b>242 529</b>	<b>6 307</b>	<b>19 473</b>	<b>1 055</b>	<b>262 002</b>	<b>7 362</b>

### Validation

Afin de compléter l'analyse, le total de la consommation en eau résidentielle, agricole et industrielle, commerciale et institutionnelle pour les réseaux d'aqueduc a été comparé aux déclarations de prélèvement faites par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et remise au MELCC. Les déclarations de 2014 à 2019 inclusivement ont été utilisées afin d'obtenir une valeur moyenne annuelle (Tableau A.15). La déclaration de 2020 n'a pas été utilisée, car, en raison de la pandémie mondiale et la diminution du tourisme en découlant, les valeurs obtenues sont moins représentatives de la réalité en situation normale. De plus, pour l'île de la Grande Entrée, l'année 2014 n'a pas été prise en compte, car il s'agissait de la première année d'exploitation du système d'aqueduc et le volume d'eau prélevé était donc moins représentatif.

**Tableau A.15 : Volume d'eau (m<sup>3</sup>) des déclarations de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine au MELCC**

Année / Île	Grande Entrée	Havre aux Maisons	Cap aux Meules	Havre aux Maisons	Île d'Entrée
2014	-	299 740	1 276 496	453 271	483
2015	29 244	321 735	1 332 851	439 023	497
2016	28 192	282 371	1 417 726	415 226	451
2017	33 083	234 015	1 482 466	379 494	491
2018	41 210	318 557	1 218 273	362 992	450
2019	38 111	297 819	1 200 343	351 881	518
<b>Moyenne</b>	<b>33 968</b>	<b>292 373</b>	<b>1 321 359</b>	<b>400 315</b>	<b>482</b>

Ces données sont comparées aux valeurs obtenues à la suite des estimations pour la consommation d'eau actuelle (Tableau A.16), pour les îles possédant un réseau d'aqueduc. On constate alors une différence notable entre ce qui est déclaré et ce qui est estimé. En effet, les estimations actuelles sous-estiment la consommation en eau, à l'exception de l'île de la Grande Entrée et l'île d'Entrée, pour lesquels les calculs surestiment la consommation réelle. Ainsi, afin de mieux faire correspondre les estimations avec les déclarations faites au MELCC, des ajustements ont été réalisés.

**Tableau A.16 : Synthèse des résultats d'utilisation de l'eau (m<sup>3</sup>/an) pour l'ensemble des îles, avant ajustement des données**

Source d'appr.	Secteur d'activité		Municipalité des Îles-de-la-Madeleine							Municipalité Grosse Île	Total Communauté maritime
			Île d'Entrée	Havre Aubert	Cap aux Meules	Havre aux Maisons	Île aux loups	Grande Entrée	Total	Grosse Île (incluant Old Harry)	
Réseau	Résidentiel	Permanent	3 194	205 130	606 174	175 291	0	46 264	1 036 053	0	<b>1 036 053</b>
		Non permanent	567	45 242	90 402	38 589	0	5 828	180 627	0	<b>180 627</b>
	Agricole		0	10 198	5 651	3 616	0	94	19 559	0	<b>19 559</b>
	ICI *		0	4 198	207 912	35 922	0	13 970	262 002	0	<b>262 002</b>
	Sous-total		3 760	264 768	910 139	253 418	0	66 155	1 498 241	0	<b>1 498 241</b>
	Déclarations MELCC		482	400 315	1 321 359	292 373	-	33 968	2 048 497	-	<b>2 048 497</b>
Hors réseau	Résidentiel	Permanent	2 281	15 056	45 078	1 186	16 060	6 114	85 775	43 161	<b>128 663</b>
		Non permanent	405	3 321	6 723	261	971	0	11 680	1 943	<b>13 623</b>
	Agricole		0	4 836	3 454	0	0	0	8 290	0	<b>8 290</b>
	ICI *		0	0	0	0	0	0	0	7 362	<b>7 362</b>
	Sous-total		2 686	23 213	55 254	1 447	17 031	6 114	105 745	52 466	<b>158 211</b>
<b>Total</b>	Résidentiel	Permanent	5 475	220 186	651 251	176 478	16 060	52 378	1 121 828	43 161	<b>1 164 989</b>
		Non permanent	971	48 563	97 125	38 850	971	5 828	192 308	1 943	<b>194 250</b>
	Agricole		0	15 034	9 105	3 616	0	94	27 849	0	<b>27 849</b>
	ICI *		0	4 198	207 912	35 922	0	13 970	262 002	7 362	<b>269 364</b>
	<b>Total</b>		<b>6 446</b>	<b>287 981</b>	<b>965 393</b>	<b>254 865</b>	<b>17 031</b>	<b>72 269</b>	<b>1 603 986</b>	<b>52 466</b>	<b>1 656 451</b>

### Ajustement des données

Un ajustement a été fait sur les données de consommation d'eau annuelle estimée pour les conditions actuelles sur le réseau d'aqueduc, pour pallier à la différence avec les déclarations faites au MELCC.

Dans un premier temps, afin d'être en mesure de présenter des projections réalistes en accord avec les consommations d'eau actuelle, des corrections ont été apportées sur les estimations réalisées précédemment. Tout d'abord, le nombre d'habitants desservis par le réseau d'aqueduc pour l'île de la Grande Entrée est ajusté, passant de 507 à 300 et celui pour l'île d'Entrée est passé de 35 à 10. Ces nouvelles valeurs ne constituent pas des valeurs connues spécifiquement, mais correspondent à un ordre de grandeur plus réaliste selon la planificatrice-coordonnatrice des services techniques et réseaux publics de la municipalité des îles de la Madeleine. De plus, le nombre de jours de résidence des touristes sur l'île d'Entrée a été diminué, passant d'une moyenne de 10 à 2, ce qui est plus réaliste pour cette île. Les calculs ont donc été ajustés avec ces nouvelles valeurs.

À la suite de ses modifications, comme il subsistait encore un écart entre les estimations actuelles réalisées pour la consommation en eau sur l'aqueduc et les déclarations faites au MELCC, ces estimations ont été modifiées afin de correspondre aux déclarations. Pour ce faire, les proportions calculées dans les estimations pour les différents usages de l'eau (résidentiel, agricole, ICI), jugées réalistes, ont été conservées. Elles ont ensuite été appliquées aux valeurs de la moyenne des déclarations au MELCC pour 2014-2019 pour chaque île. Un exemple est présenté pour l'île du Cap aux Meules au Tableau A.17 et les proportions utilisées pour chaque île sont présentées au Tableau A.18.

**Tableau A.17 : Utilisation de l'eau sur le réseau d'aqueduc pour l'île du Cap aux Meules – Estimations initiales et ajustement des données**

Utilisation	Consommation en eau (m <sup>3</sup> /an) provenant des estimations initiales	Proportion d'utilisation de l'eau des différents secteurs d'activité (%)	Consommation en eau (m <sup>3</sup> /an) ajustée aux déclarations du MELCC
Résidentiel	606 174	66,6	880 056
Tourisme	90 402	9,9	131 248
Agricole	5 651	0,6	8 205
ICI *	207 912	22,8	301 851
<b>Total</b>	<b>910 139</b>	<b>100</b>	<b>1 321 359</b>

ICI\* : Industriel, Commercial et Institutionnel

**Tableau A.18 : Proportion d'utilisation de l'eau des différents secteurs d'activité (%) pour les îles ayant un réseau d'aqueduc**

Utilisation	Île d'Entrée	Havre Aubert	Cap aux Meules	Havre aux Maisons	Grande Entrée
Résidentiel	85,0	77,5	66,6	69,2	69,9
Tourisme	15,0	17,1	9,9	15,2	8,8
Agricole	0,0	3,8	0,6	1,4	0,2
ICI *	0,0	1,6	22,9	14,2	21,1

ICI\* : Industriel, Commercial et Institutionnel

À la suite de ces modifications, de nouvelles valeurs de consommation en eau sur le réseau d'aqueduc ont été obtenues pour chaque île. Ce sont ces nouvelles valeurs qui sont présentées comme résultats finaux pour les estimations de consommation d'eau actuelle (voir Tableau 3.4 de la Section 3.2.1).

### **Projections pour les réseaux municipaux pour 2050**

La méthodologie présentée ici se concentre sur les projections de la consommation en eau pour les réseaux municipaux de distributions en eau potable pour l'année 2050. Les calculs effectués reprennent certains aspects utilisés pour le calcul de la consommation en eau actuelle. Les valeurs ajustées en fonction des déclarations moyennes pour 2014-2019 au MELCC pour le secteur agricole et le secteur industriel, commercial et institutionnel (ICI), sont directement utilisées pour les projections en 2050. En effet, selon les responsables de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, ces secteurs d'activité sont assez stables dans la région d'étude et aucune information connue à ce jour ne justifie un changement dans les demandes en eau futures.

Pour calculer la consommation en eau résidentielle, la population desservie a été multipliée par la consommation résidentielle journalière et par le nombre de jours d'utilisation par année. Pour réaliser les projections, des variations dans le nombre de résidents permanents et le nombre de résidents non permanents ont été appliquées.

La valeur de la consommation résidentielle journalière (L/personne/jour) utilisée, quant à elle, a été calculée pour chaque île, à partir des valeurs de consommation en eau résidentielle actuelle ajustées. Ainsi, les valeurs du Tableau 3.4 de la Section 3.2.1 ont été utilisées. Pour chaque île, le sommaire de l'utilisation de l'eau résidentielle, comprenant les résidents permanents et non permanents, a été utilisé. Pour calculer la consommation résidentielle journalière, le nombre de résidents permanents et non permanents devaient être connus, afin d'appliquer la formule suivante :

*Consommation résidentielle journalière (m<sup>3</sup>/personne/jour) =*

$$\frac{\text{Utilisation de l'eau résidentielle de l'île (m}^3/\text{an)}}{((\text{Nb résidents permanents} \times 365 \text{ jours}) + (\text{Nb résidents non permanents} \times \text{Temps de résidence moyenne}^*))} \quad (3)$$

\*cette valeur est de 10 jours pour toutes les îles, à l'exception de l'île d'Entrée, où la valeur est 2 jours

Les valeurs qui ont été déterminées lors de l'estimation initiale de la consommation en eau ont été utilisées pour les résidents sur l'aqueduc, à l'exception de l'île de la Grande Entrée et de l'île d'Entrée, pour lesquelles la valeur a été modifiée lors de l'ajustement. Le nombre de résidents, permanents ou non, et les résultats du calcul pour la consommation résidentielle journalière sont présentés au Tableau A.19.

**Tableau A.19: Valeurs utilisées pour le calcul de la consommation résidentielle journalière ajustée**

Île	Nombre de résidents ajustés		Consommation résidentielle ajustée (m <sup>3</sup> /an)	Consommation résidentielle journalière calculée (L/pers./jour)
	Permanents	Non permanents		
Île d'Entrée	10	65	482	127
Havre Aubert	2 248	18 097	378 548	378
Cap aux Meules	6 643	36 161	1 011 304	363
Havre aux Maisons	1 921	15 436	246 758	288
Grande Entrée	300	2 331	26 747	201
<b>Îles de la Madeleine</b>	<b>11 122</b>	<b>72 089</b>	<b>1 663 839</b>	<b>348*</b>

\*Corresponds à la moyenne pondérée de l'ensemble des îles

Les nouvelles valeurs de la consommation résidentielle journalière (L/personne/jour) calculées sont donc utilisées pour les projections futures. Afin de faire varier ces valeurs et le nombre de résidents permanents et non permanents pour les projections, une borne inférieure et une borne supérieure pour chaque paramètre sont établies. Par la suite, l'intervalle ainsi créé est subdivisé en 100 valeurs intermédiaires uniformément distribuées, afin de calculer 1 000 000 (100<sup>3</sup>) valeurs de consommation totale. Les sections suivantes expliquent les choix pour les bornes inférieures et supérieures des différents paramètres. Pour la consommation résidentielle journalière (L/personne/jour), un intervalle de  $\pm 10\%$  a été appliqué à chaque valeur pour tenir compte de l'incertitude liée à cette dernière.

### **Nombre de résidents permanents**

Le nombre de résidents permanents est connu pour 2020, mais seulement par municipalité. Ainsi, pour connaître le nombre d'habitants pour chaque île, un calcul a été réalisé à partir du nombre d'installations septiques. On peut se rappeler que le calcul réalisé dans les estimations actuelles donne 12 767 résidents pour l'ensemble de l'archipel. Pour les estimations futures, un nombre de résidents pour l'ensemble de l'archipel a été choisi en fonction des informations disponibles. Pour choisir ce nombre, les projections réalisées par l'Institut de la statistique du Québec sont utilisées.

Des pourcentages de variation par an ont été calculés à partir des valeurs fournies par l'ISQ pour l'horizon 2016-2041 (ISQ, 2021b) et calculés à partir d'une population totale pour l'archipel de 12 767 résidents en 2020. Dans un premier temps, les projections de 2019 et de 2021 de l'ISQ pour les îles de la Madeleine ont été utilisées. La tendance était à la baisse en 2019 (-0,4 %/an), menant à une population d'environ 10 800 habitants pour 2050. Toutefois, cette tendance est devenue à la hausse en 2021 (+0,1 %/an), menant à environ 13 100 habitants pour 2050. Ce changement est en lien à la pandémie mondiale, qui a causé un regain pour l'achat de maisons en région éloignée (ISQ, 2021a). Comme cet effet est récent et que son effet à long terme est incertain, il a été décidé d'utiliser les deux scénarios dans les projections futures. De plus, la projection de l'ISQ pour 2021 pour l'ensemble du Québec présente une augmentation encore plus importante, soit de +0,5 %/an, menant à une population d'environ 14 900 habitants pour l'ensemble des îles de la Madeleine. Les deux scénarios choisis sont donc 10 800 et 14 900 habitants et les simulations sont réalisées entre ses deux bornes.

Comme ces valeurs représentent la population totale, des calculs sont nécessaires afin de déterminer le nombre d'habitants par île et le nombre desservi par un système d'aqueduc. Les proportions de répartition de la population totale sur les îles et les proportions des résidents desservis par l'aqueduc,

qui ont été obtenues lors des estimations actuelles ajustées, ont été conservées. Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau A.20. À noter que le nombre de résidents permanents desservis par l'aqueduc comprend les changements faits pour la population de l'île de la Grande Entrée et l'île d'Entrée et diffère donc des valeurs obtenues au Tableau A.19.

**Tableau A.20 : Répartition des résidents permanents desservis par l'aqueduc pour les projections de 2050**

Île	Proportion de la population totale par île (%)	Proportion de résidents permanents desservis par aqueduc sur chaque île (%)	Nombre de résidents permanents desservis par l'aqueduc pour le scénario		
			Actuel ajusté	Minimum	Maximum
Île d'Entrée	0,5	16,7	10	8	12
Havre Aubert	18,9	93,2	2 248	1 901	2 624
Cap aux Meules	55,9	93,1	6 643	5 620	7 753
Havre aux Maisons	15,1	99,3	1 921	1 625	2 242
Grande Entrée	4,5	52,3	300	254	350
<b>Total</b>	<b>94,9</b>	<b>90,0</b>	<b>11 122</b>	<b>9 408</b>	<b>12 981</b>

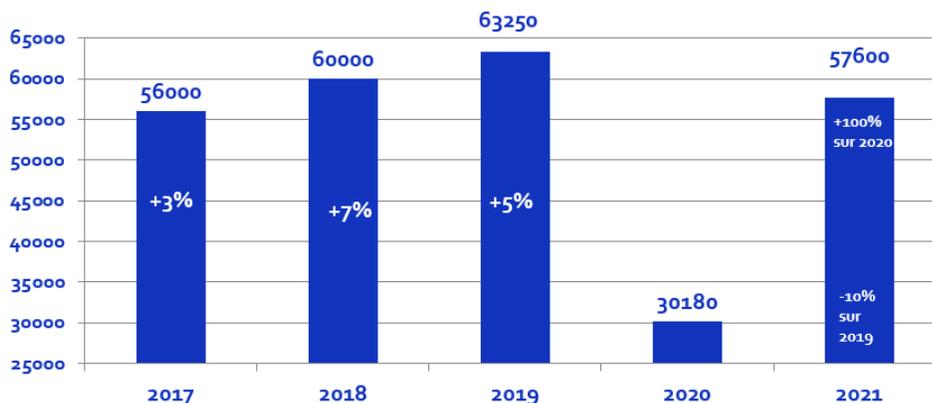
### **Nombre de résidents non permanents**

Comme mentionné précédemment, les résidents non permanents comprennent les personnes possédant une résidence aux îles de la Madeleine, mais n'y résidant que quelques semaines par année et les touristes. L'arrivée de ces gens sur l'archipel est comptabilisée ensemble. Pour rappel, en 2018, 77 700 visiteurs ont été dénombrés (Tourisme Îles de la Madeleine, 2019), dont la majorité (60 000 visiteurs, 77 %) est venue durant la saison estivale de juin à septembre.

En observant les valeurs des années précédentes, les valeurs sont à la hausse entre 2017 et 2019. Une baisse importante est observable en 2020, due à la pandémie mondiale. Puis, on observe un retour du tourisme en 2021 (Tourisme Îles de la Madeleine, 2021). La Figure A.29 présente l'évolution de l'achalandage pour la saison estivale de juin à septembre, dans les dernières années.



## Évolution des entrées de 2017 à 2021 (juin à sept)



**Figure A.29 : Évolution du tourisme aux îles de la Madeleine entre 2017 et 2021 (tiré de Tourisme Îles de la Madeleine, 2021)**

Ainsi, un scénario à la baisse et un à la hausse ont été inclus dans les prévisions. Les valeurs choisies ne proviennent pas de calculs ou valeurs connues précisément. Elles représentent des variations jugées raisonnables afin de pouvoir évaluer l'impact de l'augmentation du tourisme sur la demande en eau. Ainsi, un minimum de 70 000 visiteurs et un maximum de 100 000 ont été établis pour les projections en 2050. Les valeurs présentées ici comprennent les visiteurs pour l'ensemble des îles. Afin de déterminer le nombre de résidents non permanents par île et lesquels sont desservis par les réseaux d'aqueduc, les proportions utilisées pour les estimations de 2020 sont utilisées. Les valeurs utilisées et les résultats par île sont présentés au Tableau A.21.

**Tableau A.21 : Répartition des résidents non permanents desservis par l'aqueduc pour les projections de 2050**

Île	Proportion des résidents non permanents par île (%)	Proportion de résidents non permanents desservis par aqueduc (%)	Nombre de résidents non permanents desservis par l'aqueduc pour le scénario		
			Actuel ajusté	Minimum	Maximum
Île d'Entrée	0,5	16,7	65	58	83
Havre Aubert	25	93,2	18 097	16 303	23 291
Cap aux Meules	50	93,1	36 161	32 577	46 539
Havre aux Maisons	20	99,3	15 436	13 906	19 866
Grande Entrée	3	52,3	2 331	2 100	3 000
<b>Total</b>	<b>98,5</b>	<b>90,0</b>	<b>72 089</b>	<b>64 945</b>	<b>92 779</b>

## **Annexe 4 : Tableaux sommaires de l'historique des suivis piézométriques**

**Tableau A.22 : Sondes de niveau d'eau installées dans des puits d'observation municipaux par le Groupe Madelin'Eau**

Nom du puits	No. de la base de données hydrogéologiques	No. de la sonde	Type de sonde	Données disponibles	Notes terrain du projet
<b>Île du Cap aux Meules, secteur de Fatima</b>					
FAT-09-01-PP	IDM000772	1036412	LTC	2011-12-13 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2020
FAT-09-02-PP	IDM000773	1036435	LTC	2011-12-14 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2020
FAT-09-03-PP	IDM000774	1036441	LTC	2011-12-14 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2020
FAT-09-04-PP	IDM000775	1036418	LTC	2011-12-14 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2020
P7 PZ1	IDM000733	1045033	LT	2011-12-13 – 2018-05-03 2019-08-16 – 2021-09-01	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P8 PZ1	IDM000735	1045013	LT	2011-12-13 – 2018-05-03	Comme le puits est vide d'eau et la sonde fonctionnelle, elle a été déplacée dans le puits FP-06-07-PZ en 2019
PU1 PZ1	IDM000680	1044499	LT	2011-12-13 – 2013-06-08	Sonde non retrouvée, câble sectionné dans le puits
<b>Île du Cap aux Meules, secteur de l'Étang-du-Nord</b>					
EDN-09-01-PP	IDM000784	1036409	LTC	2011-12-13 – 2015-04-06 2019-08-15 – 2020-09-17	Puits coupé en 2021, la sonde a été retirée
EDN-09-02-PP	IDM000785	1036426	LTC	2011-12-13 – 2015-04-06	Sonde non fonctionnelle en 2020
EDN-09-03-PP	IDM000786	1036424	LTC	2011-12-13 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2019
EDN-09-04-PP	IDM000787	1036422	LTC	2011-12-13 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2019
P2 PZ1	IDM000721	1045010	LT	2011-12-13 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-09-02	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P3 PZ1	IDM000723	1044466	LT	2011-12-13 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-09-02	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P4 PZ1	IDM000725	1045008	LT	2011-12-13 – 2013-06-08	Sonde non fonctionnelle en 2019

**Tableau A.22 : Sondes de niveau d'eau installées dans des puits d'observation municipaux par le Groupe Madelin'Eau (suite)**

Nom du puits	No. de la base de données hydrogéologiques	No. de la sonde	Type de sonde	Données disponibles	Notes terrain du projet
<b>Île du Cap aux Meules, secteur de l'Étang-du-Nord</b>					
P5 PZ1	IDM000727	1045005	LT	2011-12-13 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-09-02	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P6 PZ1	IDM000729	1044472	LT	2011-12-13 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-09-02	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
PU5 PZ1	IDM000731	1045031	LTC	2011-12-13 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-09-02	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
<b>Île du Cap aux Meules, secteur de Cap-aux-Meules</b>					
PU9 PZ1	IDM000718	1044716	LTC	2013-06-08 – 2017-12-31 2019-08-15 – 2021-08-31	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
<b>Île du Havre aux Maisons</b>					
HAM-09-01-PP	IDM000762	1036414	LTC	2011-12-12 – 2013-12-12	Sonde retirée du puits en décembre 2013
HAM-09-02-PP	IDM000763	1036421	LTC	2011-12-12 – 2013-12-12	Sonde retirée du puits en décembre 2013
P1 PZ1	IDM000740	1045014	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-14 – 2021-09-01	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P2 PZ1	IDM000742	1045029	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-14 – 2021-09-01	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
P3 PZ1	IDM000743	1044467	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-16 – 2020-09-18	Sonde non fonctionnelle en 2021
P4 PZ1	IDM000744	1044468	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-14 – 2021-09-01	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données
<b>Île du Havre Aubert</b>					
P3P4 PZ1	IDM000738	1044470	LT	2011-12-12 – 2013-01-27	Sonde non fonctionnelle en 2019
P3P4 PZ2	IDM000739	1045012	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-13 – 2021-08-31	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données

**Tableau A.22 : Sondes de niveau d'eau installées dans des puits d'observation municipaux par le Groupe Madelin'Eau (Suite)**

Nom du puits	No. de la base de données hydrogéologiques	No. de la sonde	Type de sonde	Données disponibles	Notes terrain du projet
<b>Île de la Grande Entrée</b>					
GE-09-01A / GE-09-01B	IDM000754 / IDM000748	1045046	LT	2011-12-12 – 2017-12-31 2019-08-12 – 2021-09-01	Sonde réinitialisée en 2021 pour permettre la collecte de nouvelles données. Lors des travaux de terrain en 2019, la sonde initialement installée dans le puits GE-09-01A a été retrouvée dans le puits GE-09-01B. Cette sonde a probablement été déplacée avant la mise en pompage du puits GE-09-01A, mais le moment exact n'est pas connu.
GE-09-03	IDM000756	1044497	LT	2011-12-12 – 2013-06-07	Sonde retirée du puits en octobre 2012
GE-09-05B	IDM000788	1044469	LT	2011-12-12 – 2014-03-20	Sonde non fonctionnelle en 2019
FE-06-03	IDM000997	1045040	LT	2011-12-12 - 2013-10-02	Sonde retirée du puits en septembre 2012
FE-06-05	IDM000999	1045042	LT	2011-12-12 – 2013-06-07	Sonde retirée du puits en septembre 2012

**Tableau A.23 : Stations de suivi du réseau de puits d'observation d'Hydro-Québec dans le cadre de l'étude de l'INRS-ETE depuis 2015**

Nom du puits	No. de la base de données hydrogéologiques	No. de la sonde	Données disponibles
HQ15-P4	IDM000807	2002610	2015-05-23 – 2016-11-23 2017-05-03 – 2019-08-14 2020-09-10 – 2021-08-31
HQ15-P8	IDM000815	-	-
HQ15-P13	IDM000820	2050500	2016-12-15 – 2018-02-05 2020-09-24 – 2021-08-31
HQ15-P20	IDM000821	2026336	2015-05-24 – 2017-12-31 2019-08-13 – 2021-09-08
HQ15-P21	IDM000842	2020035	2015-05-23 – 2016-11-23
HQ16-P19	IDM000801	2002867	2017-05-03 – 2019-08-14 2020-09-22 – 2021-09-08
P-Orange (13007084)	IDM000807	2002573	2015-05-23 – 2016-11-24 2017-05-03 – 2019-08-14 2020-09-22 – 2021-08-31

**Tableau A.24 : Stations actives du RSESQ du MELCC**

Nom de la station	No. de la base de données hydrogéologiques	No. de la sonde	Données disponibles
F-1	IDM001026	1073594 / 1073909 / 1073906 / 1073911 / 1073907	2017-06-06 – 2021-06-18
F-2	IDM001027	1073893 / 1073746 / 1073743 / 1073755 / 1073899	2017-06-06 – 2021-06-17
F-3	IDM001028	1074718 / 1073894 / 1073319 / 1073742 / 1073741	2017-06-06 – 2021-06-17
F-4	IDM001029	1073913 / 1073744 / 1073731 / 1073747 / 1073736	2017-06-06 – 2021-06-17
GE-01	IDM001030	1073505 / 1073897 / 1073895 / 1073738 / 1073748	2017-06-06 – 2021-06-18
EDN-01	IDM001031	2038693	2017-06-06 – 2017-10-06 2018-06-22 – 2021-06-19
Fatima-1	IDM001032	2010140	2018-06-22 – 2020-10-07
Fatima-2	IDM001033	2048469	2019-09-15 – 2021-06-19

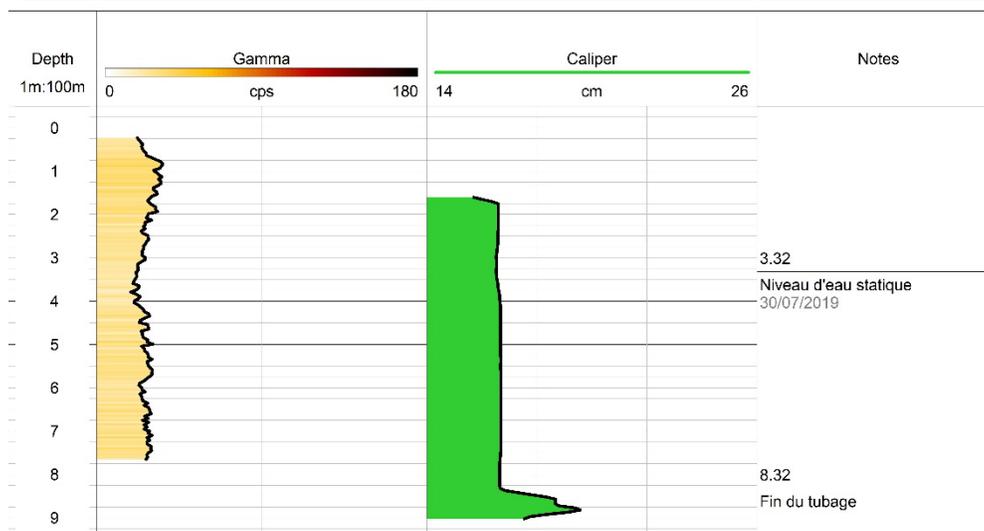
**Tableau A.25 : Anciennes stations du RSESQ du MELCC**

<b>Nom de la station</b>	<b>No. de la base de données hydrogéologiques</b>	<b>No. Station du RSESQ</b>	<b>Date d'observation</b>
Havre-Aubert (no.1)	IDM001003	13007001	1968-03-30 – 1994-08-01
Havre-Aubert (Vigneau no.8)	IDM000684	13007011	1968-03-31 – 1995-06-22
Boisville -1	IDM000677	13007021	1968-04-15 – 1985-05-22
Fatima-1	IDM000680	13007031	1968-03-31 – 1994-08-28
Havre-aux-Maisons (Le Pré)	IDM000685	13007041	1972-06-28 – 1991-11-09
Havre-aux-Maisons (Chevarie)	IDM000686	13007042	1972-10-03 – 1995-06-23
Grosse-Île (4-I)	IDM000664	13007051	-
Grosse-Île (5-I)	IDM000665	13007061	-
Grosse-Île (10-E)	IDM000656	13007071	-
Cap-aux-Meules (P-74-1)	IDM000266	13007081	-
Cap-aux-Meules (P-74-2)	IDM000265	13007082	-
Cap-aux-Meules (P-74-3)	IDM000264	13007083	-
Cap-aux-Meules (no.1 – 72-3L)	IDM000678	13007084	1972-11-03 – 1991-11-08
Cap-aux-Meules (73-1-C)	IDM000718	13007085	-
Cap-aux-Meules (no.2 – 74-1C)	IDM000679	13007086	1993-11-08 – 1999-09-22

## **Annexe 5 : Résultats des travaux de diagraphie**

**Île du Cap aux Meules**

 <b>UNIVERSITÉ LAVAL</b>		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>			
Localisation du puits: IDM001265 Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Privé Province, Pays: Québec, Canada			<b>Élévations:</b> Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle (sommet du tubage en acier) Altitude de la margelle: Inconnue Profondeur du puits par rapport à la margelle: 9.61 m		
<b>Description du site:</b> Puits résidentiel inutilisé, et deuxième puits résidentiel en fonction à une trentaine de mètres		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 50 m Diagraphie de: 0.2 m À: 9 m		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 15.8 cm Distance margelle-sol: 58 cm <b>Notes:</b> Le tubage fait 8.32 m de long.	
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) <u>30/07/2019</u> Et le: (jour/mois/année) <u>30/07/2019</u>					



**Figure A.30 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM001265**

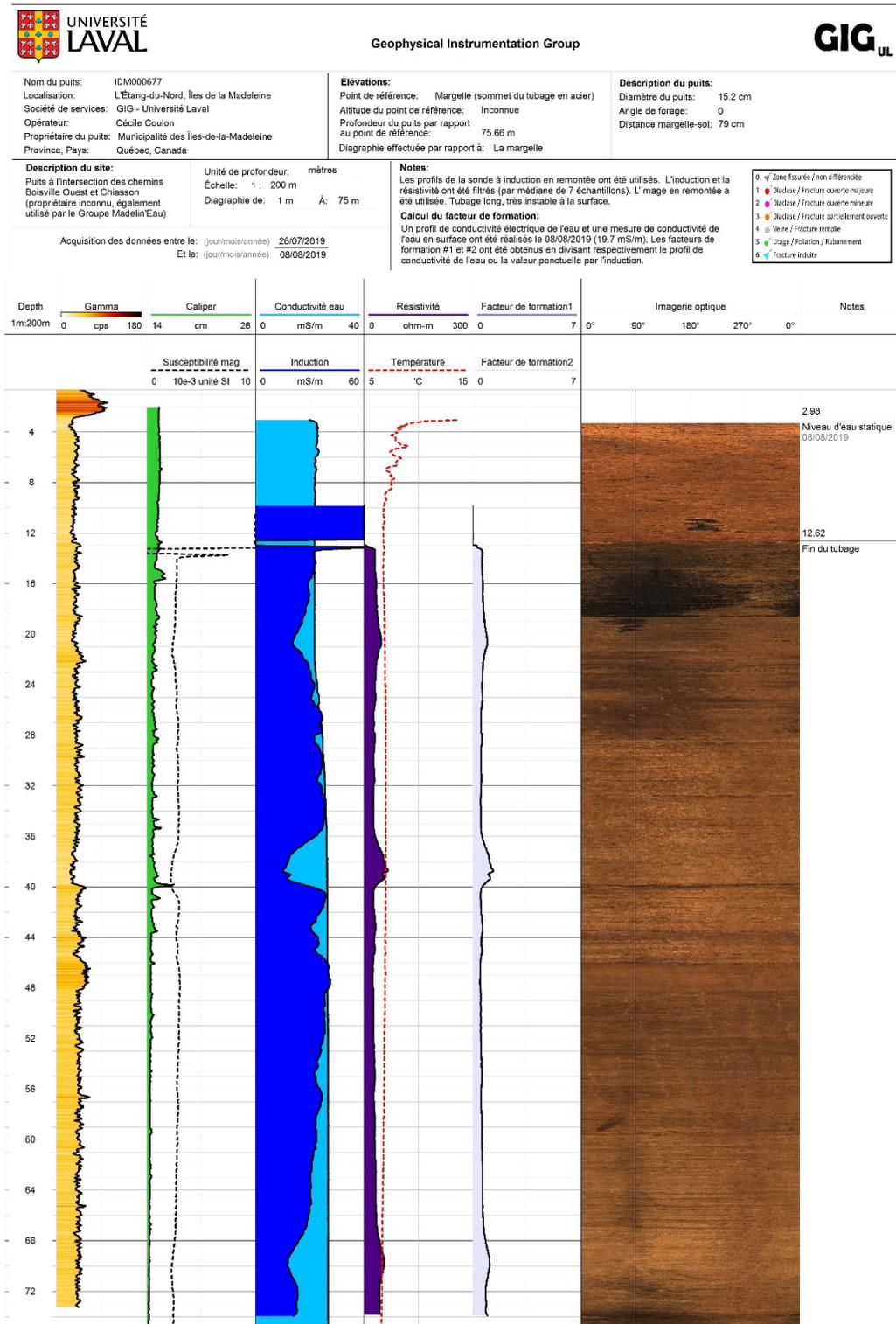


Figure A.31 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM00667

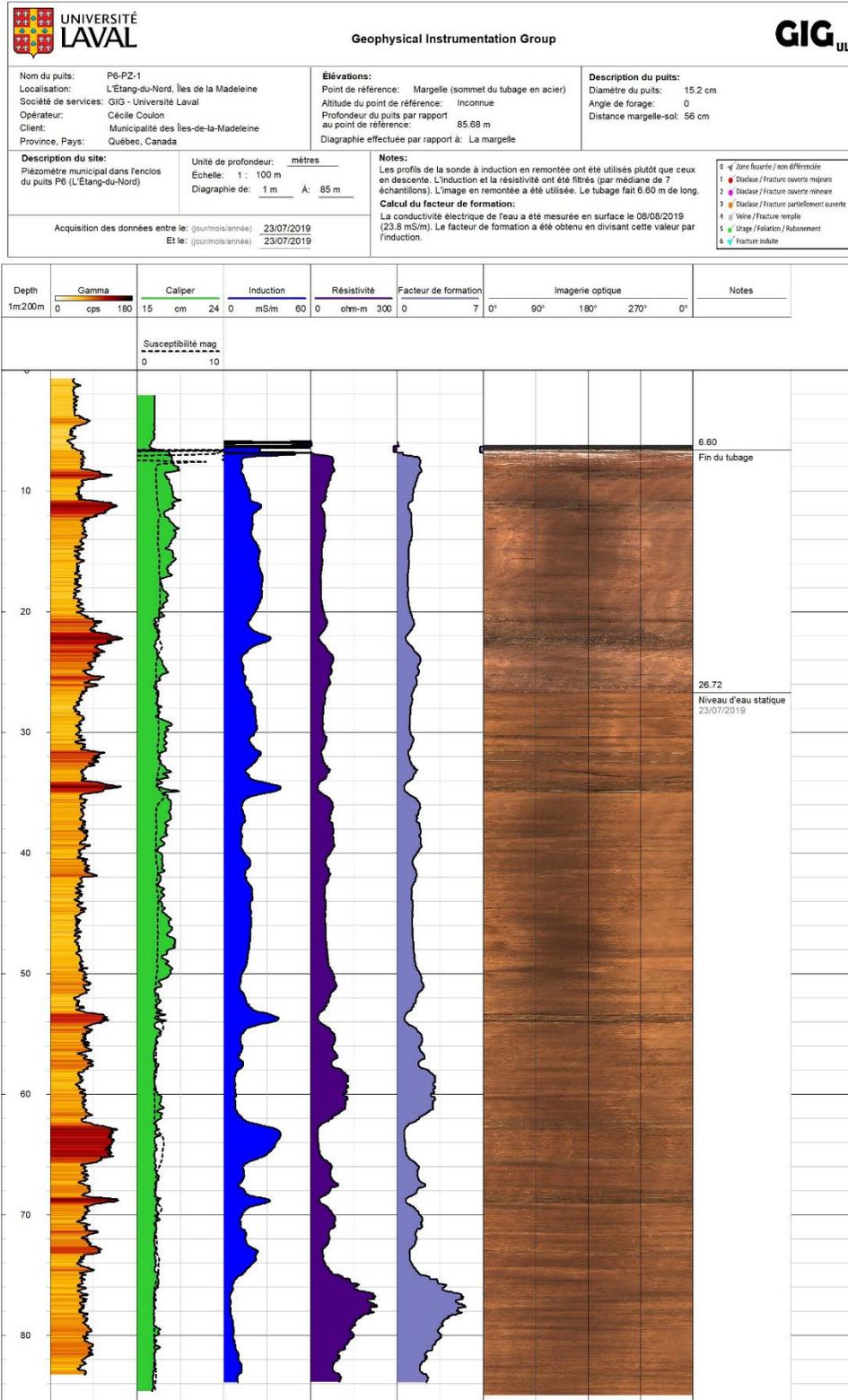


Figure A.32 : Résultats de diagraphie pour le puits P6-PZ-1

		Geophysical Instrumentation Group																	
Nom du puits: P5-PZ-1 Localisation: L'Étang-du-Nord, Îles de la Madeleine Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 60.54 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 15.2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 92 cm															
<b>Description du site:</b> Piézomètre municipal dans l'enclos du puits P5 (L'Étang-du-Nord)		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 60 m		<b>Notes:</b> Les profils de la sonde à induction en remontée ont été utilisés plutôt que ceux en descente. L'induction et la résistivité ont été filtrés (par médiane de 7 échantillons). L'image en remontée a été utilisée. <b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau a été mesurée en surface le 08/08/2019 (11.8 mS/m). Le facteur de formation a été obtenu en divisant cette valeur par l'induction. Au-dessus de l'eau, il vaut 0.															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 30/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 30/07/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

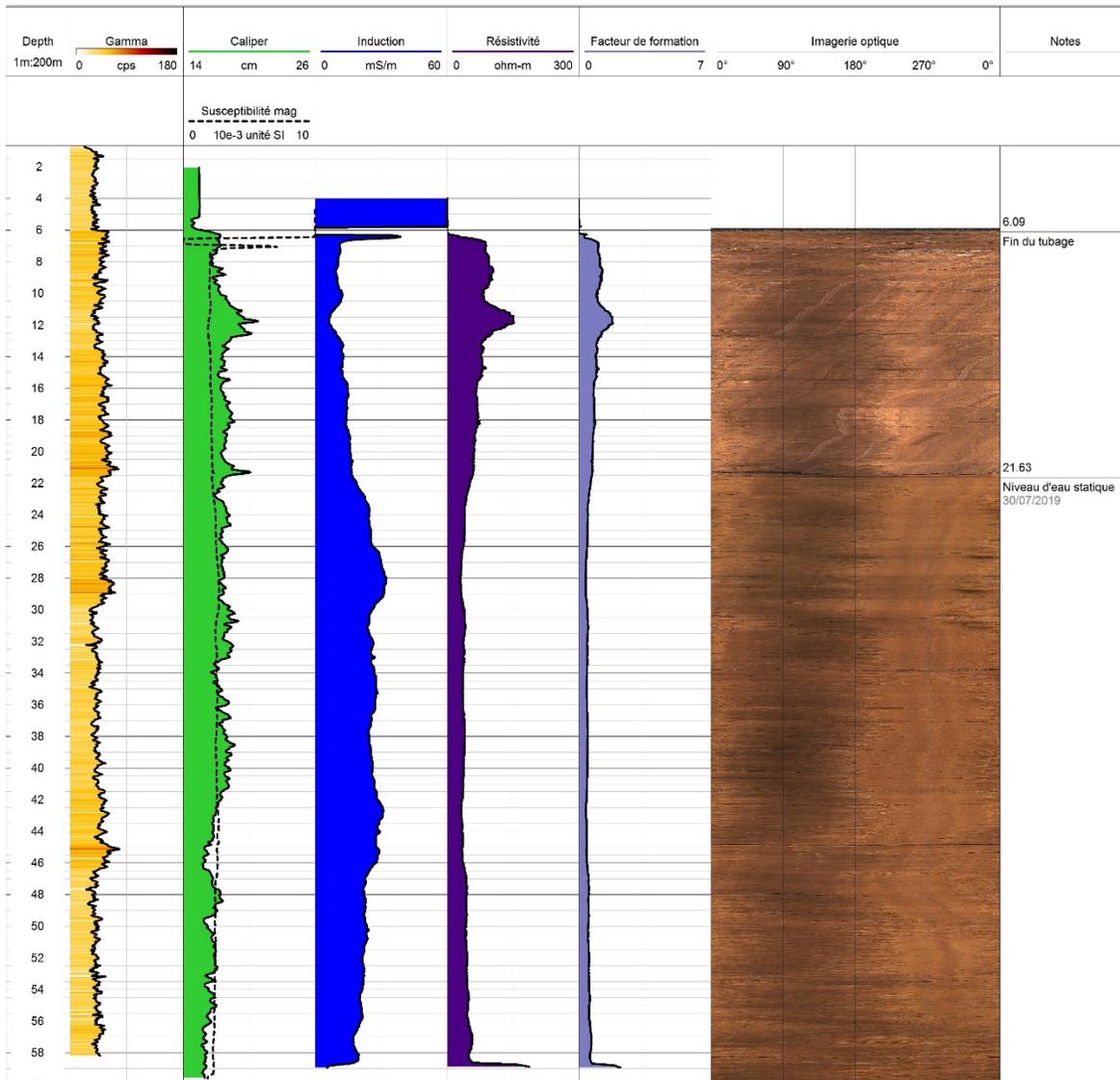


Figure A.33 : Résultats de diagraphie pour le puits P5-PZ-1

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																	
Nom du puits: P4-PZ-2 Localisation: L'Étang-du-Nord, Îles de la Madeleine Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 53.38 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 15.2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 63 cm															
<b>Description du site:</b> Piézomètre municipal dans l'enclos du puits P4 (L'Étang-du-Nord)		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 53 m		<b>Notes:</b> Les profils de la sonde à induction en remontée ont été utilisés plutôt que ceux en descente. L'induction et la résistivité ont été filtrés (par médiane de 7 échantillons). L'image en remontée a été utilisée. <b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau a été mesurée en surface le 08/08/2019 (18.8 mS/m). Le facteur de formation a été obtenu en divisant cette valeur par l'induction.															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 29/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 29/07/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diachase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diachase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diachase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diachase / Fracture ouverte majeure	2	Diachase / Fracture ouverte mineure	3	Diachase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diachase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diachase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diachase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

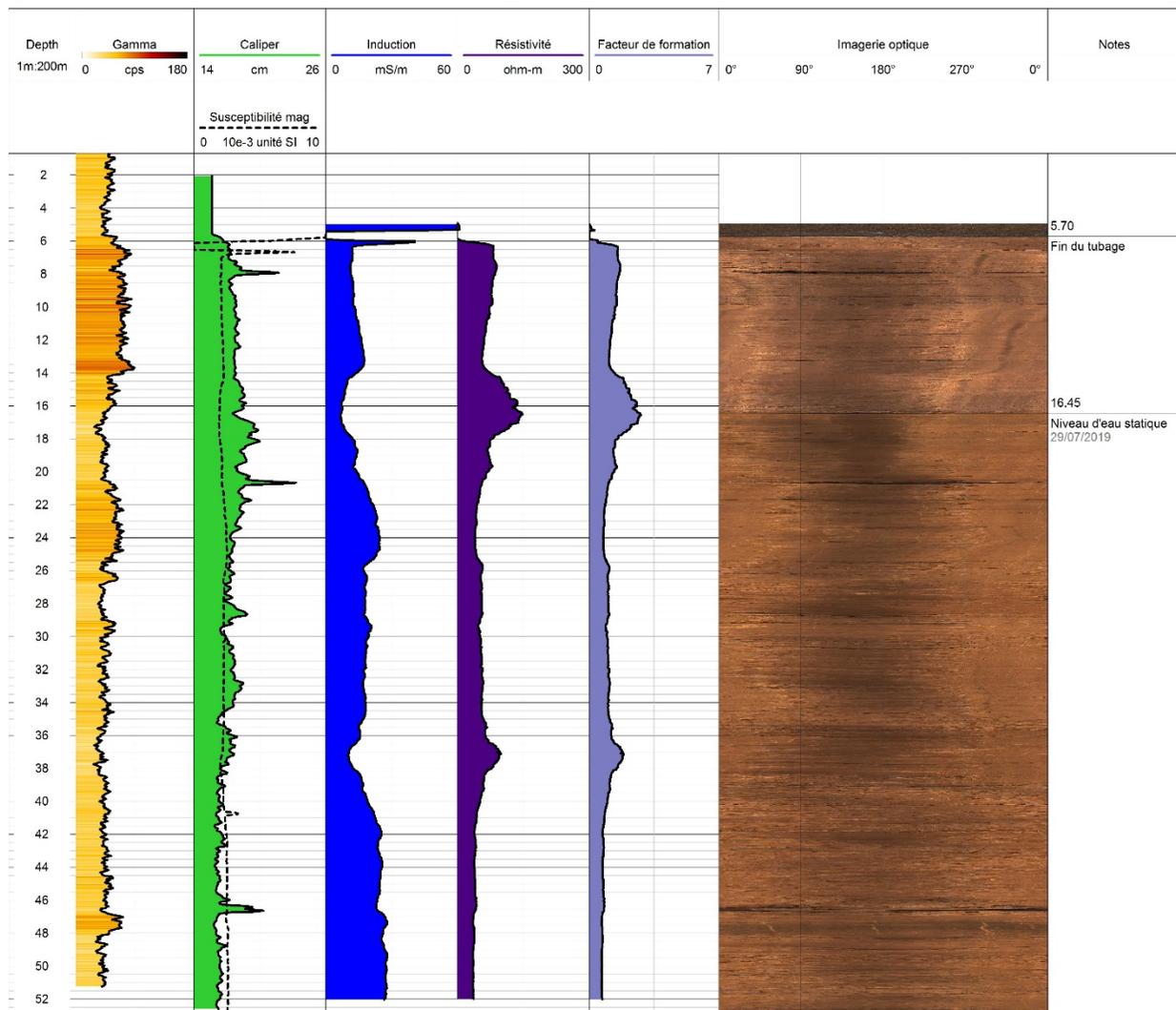


Figure A.34 : Résultats de diagraphie pour le puits P4-PZ-2

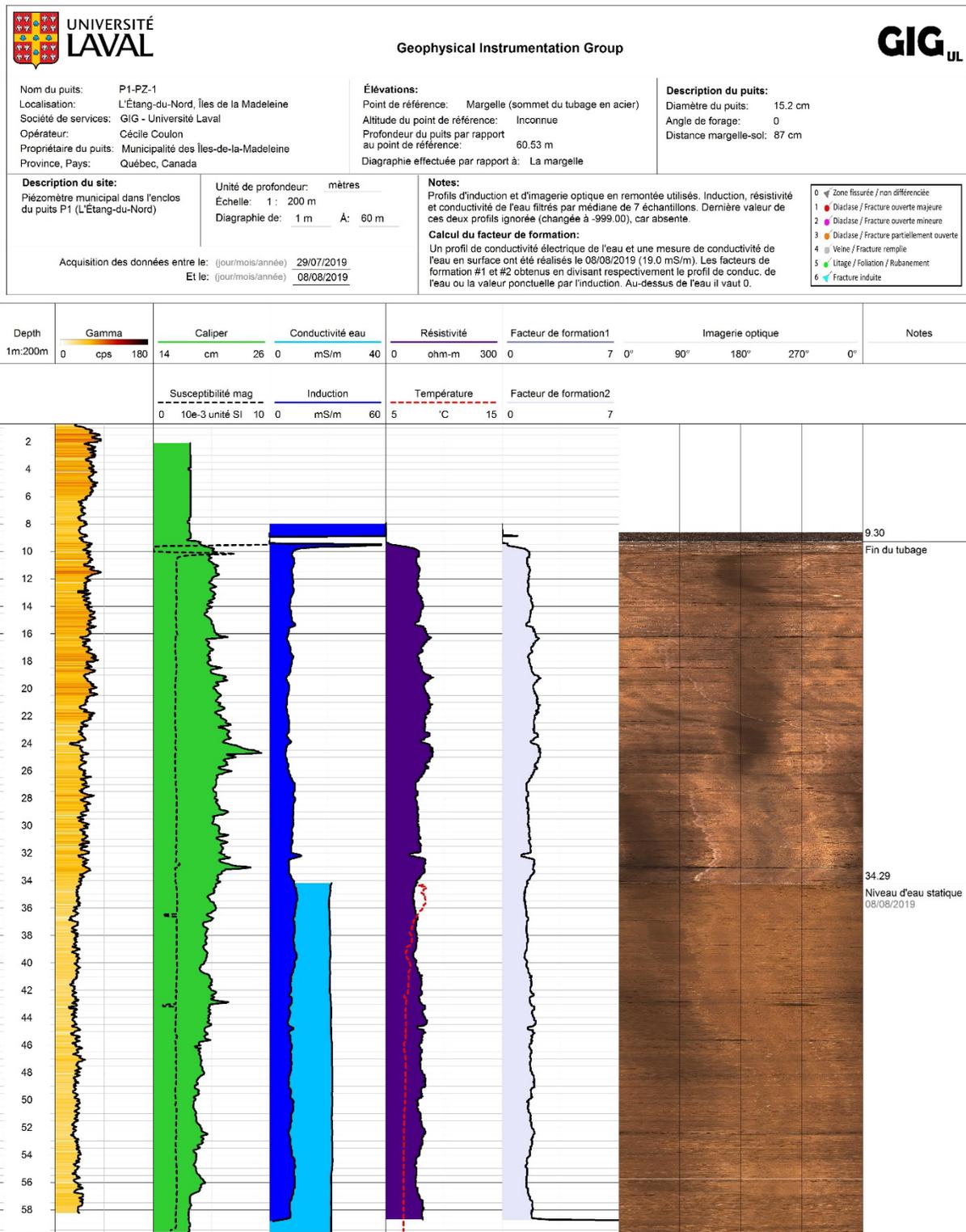


Figure A.35 : Résultats de diagraphie pour le puits P1-PZ-1

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																	
Nom du puits: IDM001260 Localisation: Cap-Aux-Meules, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Privé Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommets du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 16.96 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 16 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 44 cm															
<b>Description du site:</b> Puits privé non utilisé		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 2.31 m À: 16.60 m		<b>Notes:</b> Les profils en remontée numéro 2 ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons). La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0,5m max. <b>Calcul du facteur de formation:</b> L'induction filtrée a été prise pour calculer le facteur de formation. $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 25/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 25/07/2019				<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>		0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

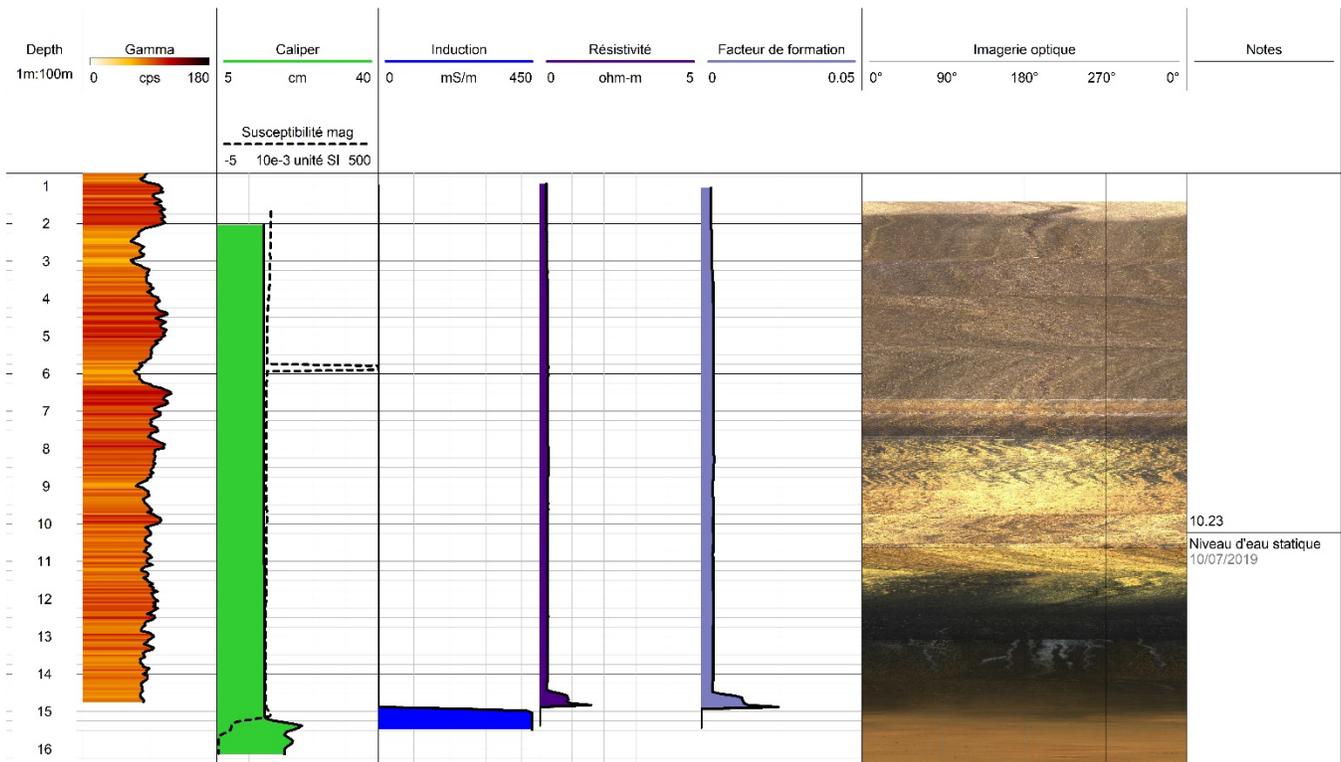


Figure A.36 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM001260

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>		
<b>Nom du puits:</b> HQ16-P8 <b>Localisation:</b> Cap-aux-Meules, îles de la Madeleine <b>Société de services:</b> GIG - Université Laval <b>Opérateur:</b> Christian Dupuis <b>Propriétaire du puits:</b> Hydro-Québec <b>Province, Pays:</b> Québec, Canada		<b>Élévations:</b> <b>Point de référence:</b> Margelle <b>Altitude du point de référence:</b> 33.57 m <b>Profondeur du puits par rapport au point de référence:</b> 33.58 m <b>Diagraphie effectuée par rapport à:</b> La margelle		<b>Description du puits:</b> <b>Diamètre du puits:</b> 13.97 cm <b>Angle de forage:</b> 0 <b>Distance margelle-sol:</b> 1 cm
<b>Description du site:</b> Le long de la route 199, devant le concessionnaire de jeep.		<b>Unité de profondeur:</b> mètres <b>Échelle:</b> 1 : 200 m <b>Diagraphie de:</b> 2 m À 31 m	<b>Notes:</b> Profils d'induction en remontée utilisés. Induction corrigée (instru. de calib. cassé lors des mesures. Résistivité recalculée: 1/(Induction). Susc. mag. semble faible.	
<b>Acquisition des données entre le:</b> (jour/mois/année) 02/06/2019 <b>Et le:</b> (jour/mois/année) 02/06/2019		<b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau n'a pas été mesurée en surface. Le facteur de formation n'a donc pas été calculé. Note supplémentaire: tube PVC crépiné entre environ 29 m et 32 m de profondeur (l/margelle). Tubage de PVC de 2" dans un tubage en acier de 5,5".		0 Zone fissurée / non différenciée 1 Diabase / Fracture ouverte majeure 2 Diabase / Fracture ouverte mineure 3 Diabase / Fracture partiellement ouverte 4 Veine / Fracture remplie 5 Litage / Foliation / Rubanement 6 Fracture induite

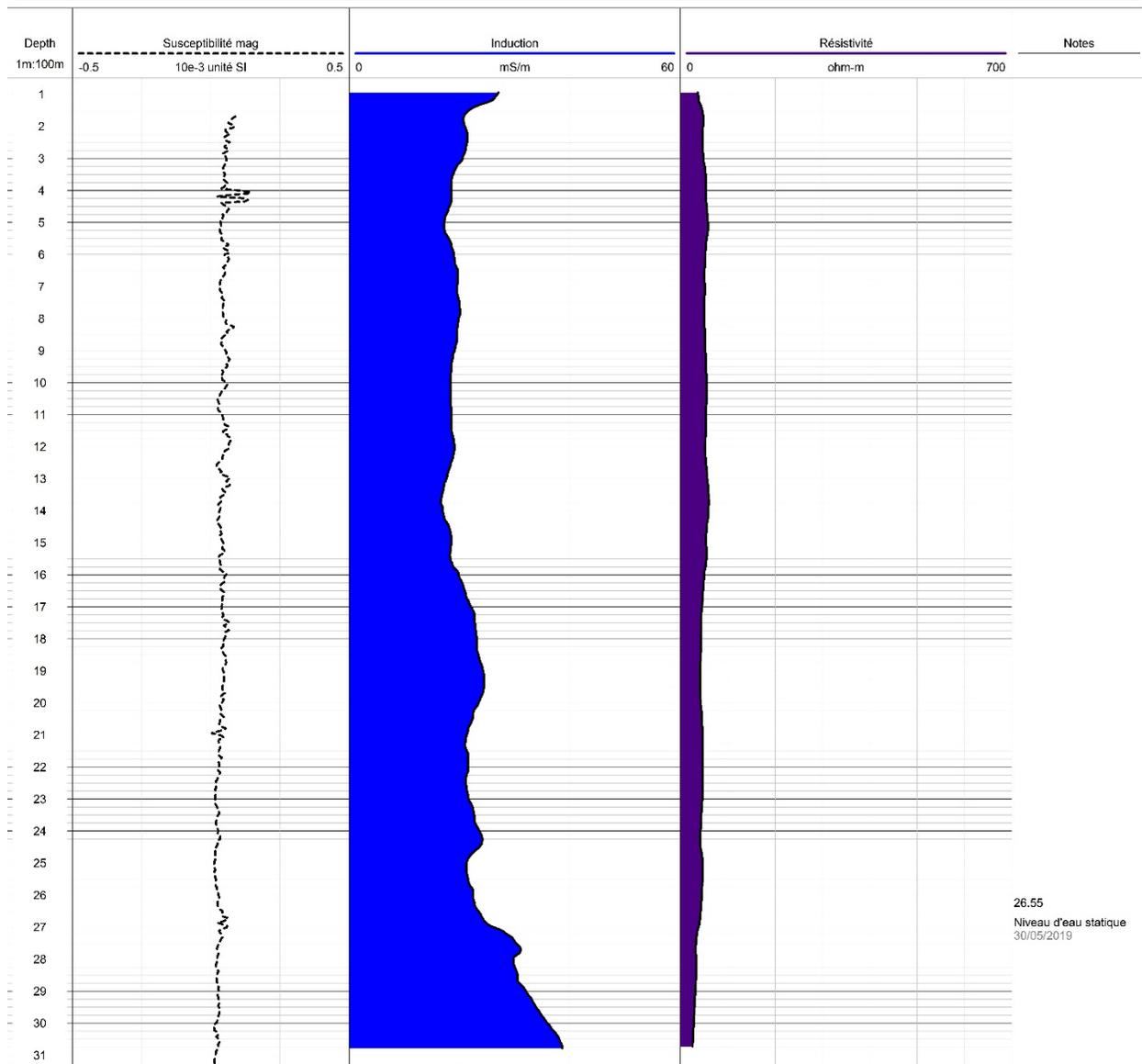


Figure A.37 : Résultats de diagraphie pour le puits HQ16-P8

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>			
<b>Nom du puits:</b> HQ16-P17 <b>Localisation:</b> Cap-aux-Meules, Îles de la Madeleine <b>Société de services:</b> GIG - Université Laval <b>Opérateur:</b> Christian Dupuis <b>Propriétaire du puits:</b> Hydro-Québec <b>Province, Pays:</b> Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle Altitude du point de référence: 27.95 m Profondeur du puits par rapport au point de référence: 32.02 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 13.97 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 0	
<b>Description du site:</b> Puits d'Hydro-Québec, extrémité nord du chemin Édouard		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 28 m		<b>Notes:</b> Profil d'induction en remontée utilisé et corrigé (instru. de calib. cassé). Induct. filtrée (médiane de 7 éch.). Résis. recalculée: 1/(Induction). Susc. mag. semble faible. Tubage de PVC de 2" dans un tubage en acier de 5.5".  <b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau a été mesurée en surface le 13/08/2019 (22.8 mS/m). Le facteur de formation a été obtenu en divisant cette valeur par l'induction. Au-dessus de l'eau, il vaut 0. Note supplémentaire: tube PVC crépiné entre environ 28.8 m et 31.8 m de profondeur (/margelle).	
				0 Zone fissurée / non différenciée 1 Diaclase / Fracture ouverte majeure 2 Diaclase / Fracture ouverte mineure 3 Diaclase / Fracture partiellement ouverte 4 Veine / Fracture remplie 5 Litage / Foliation / Rubanement 6 Fracture indute	

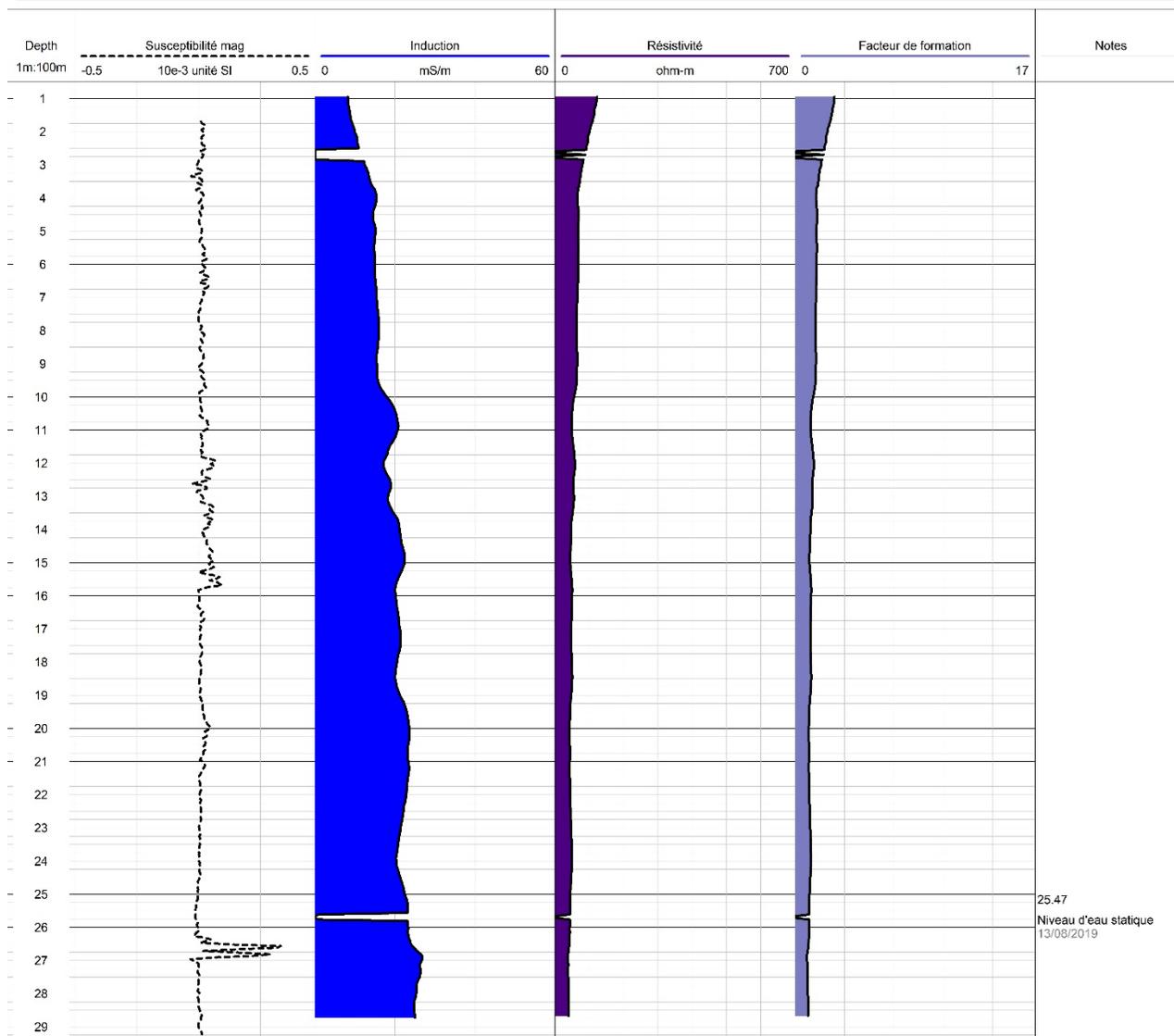


Figure A.38 : Résultats de diagraphie pour le puits HQ16-P17

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>			
Nom du puits: HQ16-P19 Localisation: Cap-aux-Meules, Îles de la Madeleine Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Christian Dupuis, Cécile Coulon Propriétaire du puits: Hydro-Québec Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle Altitude du point de référence: 38,45 m Profondeur du puits par rapport au point de référence: 39,31 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 13,97 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 0	
<b>Description du site:</b> Puits à ras du sol, au fond du chemin Mme Aubel		Unité de profondeur: mètres Echelle: 1: 200 m Diagraphie de: 1 m À: 30 m		<b>Notes:</b> Les profils de la troisième remontée de la sonde à induction ont été utilisés (calibration corrigée sur ce profil, et profils moins bruités). L'induction et la résistivité ont été filtrés (par médiane de 7 échantillons). <b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau a été mesurée en surface le 08/08/2019 (21,6 mS/m). Le facteur de formation a été obtenu en divisant cette valeur par l'induction. Au-dessus de l'eau, il vaut 0. Notes: tube PVC 2" crépiné entre environ 35,1 m et 38,1 m de profondeur (Margelle). Tubage en acier de 5,5"	
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 02/06/2019 Et le: (jour/mois/année) 05/08/2019				0: Zone floue / non différenciable 1: Dégel / Fracture ouverte majeure 2: Dégel / Fracture ouverte mineure 3: Dégel / Fracture partiellement ouverte 4: Veine / Fracture remplie 5: Litage / Foration / Ruissellement 6: Fracture latérale	

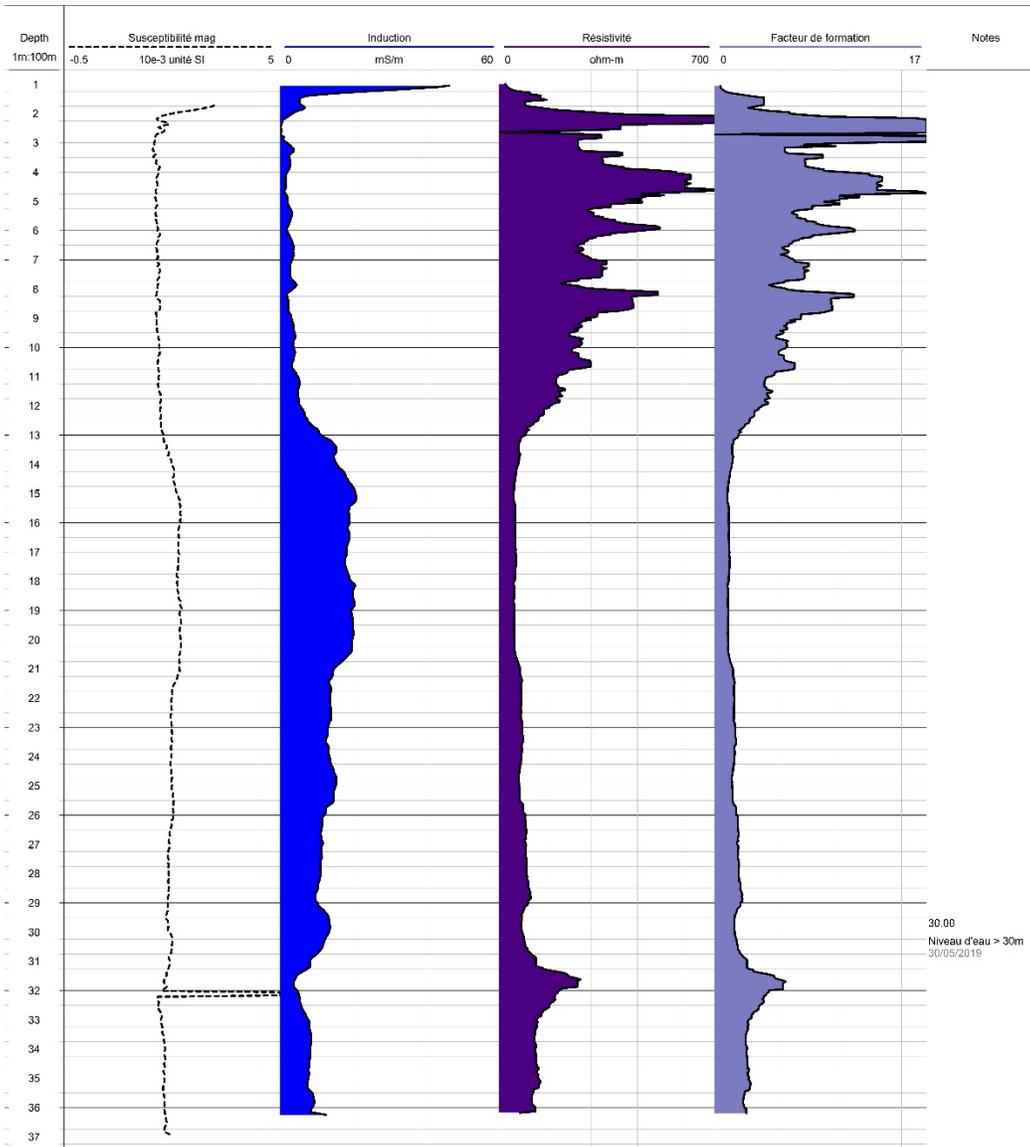


Figure A.39 : Résultats de diagraphie pour le puits HQ16-P19

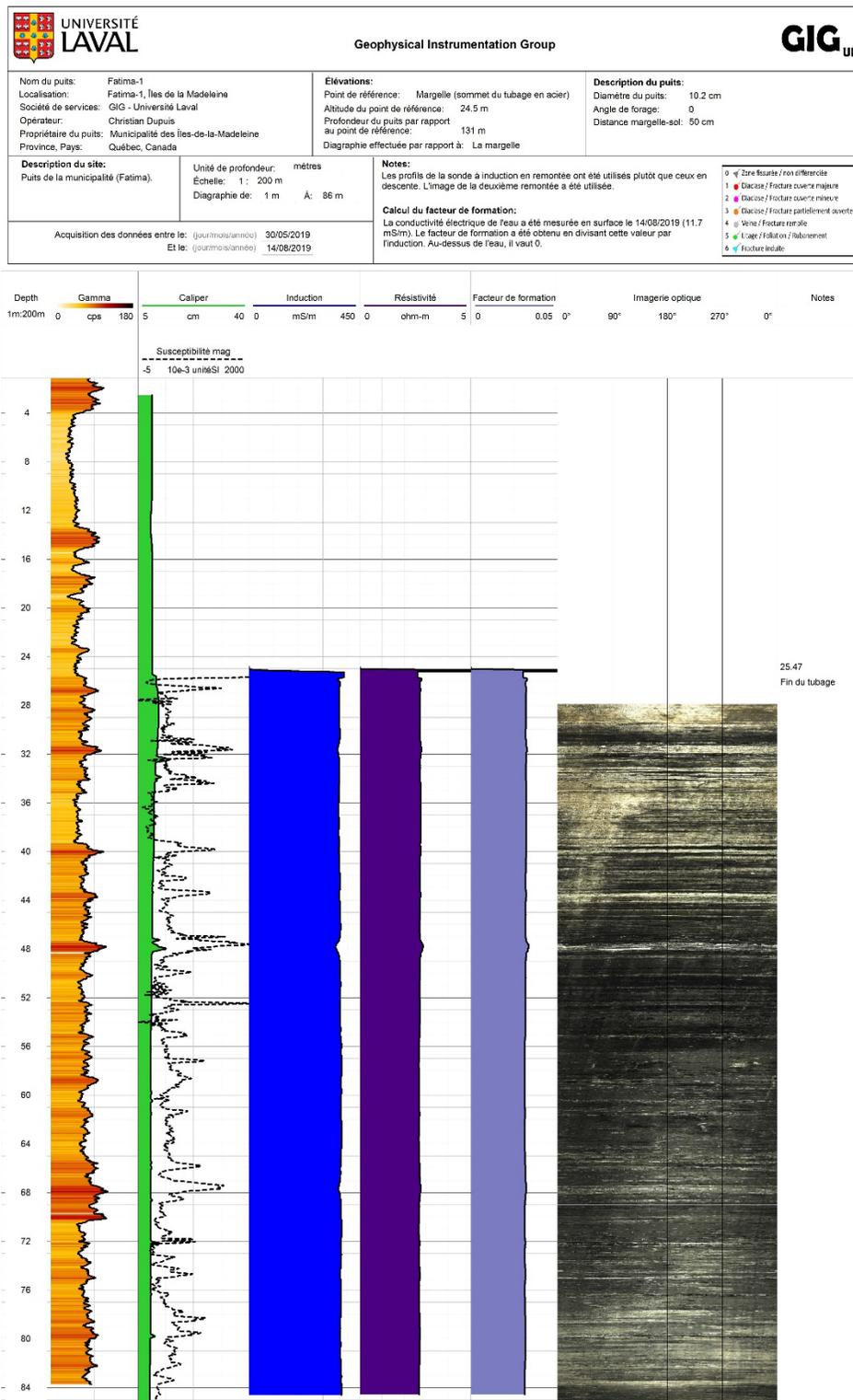


Figure A.40 : Résultats de diagraphie pour le puits Fatima-1

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																
Nom du puits: EDN-01 Localisation: Étang-du-Nord, Cap aux Meules Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Christian Dupuis Client: MELCC Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (tubage en acier) Altitude du point de référence: 15,06 m Profondeur du puits par rapport au point de référence: 201,17 m Diagraphie effectuée par rapport à: la margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 15,2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 0,80 m														
<b>Description du site:</b>		Unité de profondeur: <u>      </u> mètre Échelle: 1 : 600 Diagraphie de: <u>12,5</u> Å: <u>191</u>	<b>Notes:</b>  <b>Calcul du facteur de formation:</b>															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) <u>XX/XX/2017</u> Et le: (jour/mois/année) <u>XX/XX/2017</u>		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diachse / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diachse / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diachse / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>			0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diachse / Fracture ouverte majeure	2	Diachse / Fracture ouverte mineure	3	Diachse / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																	
1	Diachse / Fracture ouverte majeure																	
2	Diachse / Fracture ouverte mineure																	
3	Diachse / Fracture partiellement ouverte																	
4	Veine / Fracture remplie																	
5	Litage / Foliation / Rubanement																	
6	Fracture induite																	

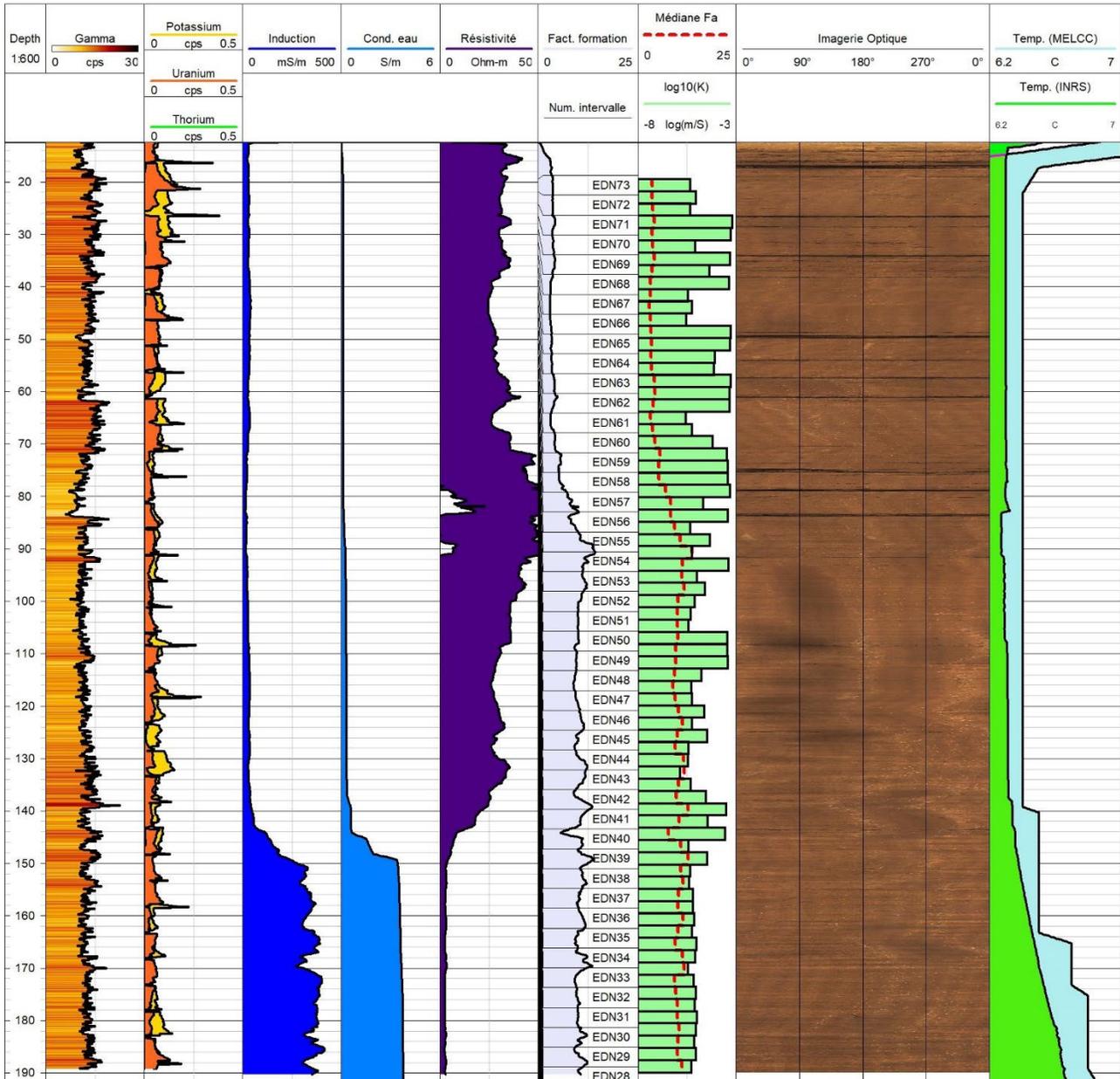


Figure A.41 : Résultats de diagraphie pour le puits EDN-01

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>			
<b>Nom du puits:</b> PU1-PZ1-13007031 <b>Localisation:</b> Cap-Aux-Meules, Îles de la Madeleine <b>Société de services:</b> GIG – Université Laval <b>Opérateur:</b> Cécile Coulon <b>Propriétaire du puits:</b> Municipalité des Îles-de-la-Madeleine <b>Province, Pays:</b> Québec, Canada		<b>Élévations:</b> <b>Point de référence:</b> Margelle (sommet du tubage en acier) <b>Altitude du point de référence:</b> Inconnue <b>Profondeur du puits par rapport au point de référence:</b> 73.10 m <b>Diagraphie effectuée par rapport à:</b> La margelle		<b>Description du puits:</b> <b>Diamètre du puits:</b> 15.2 cm <b>Angle de forage:</b> 0 <b>Distance margelle-sol:</b> 121 cm	
<b>Description du site:</b> Puits de la municipalité (Fatima).		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1: 200 m Diagraphie de: 1 m À: 24 m		<b>Notes:</b> Profils d'induction en remontée utilisés. Ind. corrigée (instru. de calib. cassé lors de la mesure: 55 - 97.49691717 + 0.413312421 * (568.523 - (Induction) ) / 0.568182 Ind. filtrée (médiane de 7 éch.). Rés. recalculée: 1/(Induction). <b>Calcul du facteur de formation:</b> La conductivité électrique de l'eau a été mesurée en surface le 14/08/2019 (37.7 mS/m). Le facteur de formation a été obtenu en divisant cette valeur par l'induction. Au-dessus de l'eau, il vaut 0.	
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 02/06/2019 Et le: (jour/mois/année) 14/08/2019				<ul style="list-style-type: none"> <li>0 Zone fissurée / non différenciée</li> <li>1 Diaclase / Fracture ouverte majeure</li> <li>2 Diaclase / Fracture ouverte mineure</li> <li>3 Diaclase / Fracture partiellement ouverte</li> <li>4 Veine / Fracture remplie</li> <li>5 Litage / Foliation / Rubanement</li> <li>6 Fracture indolite</li> </ul>	

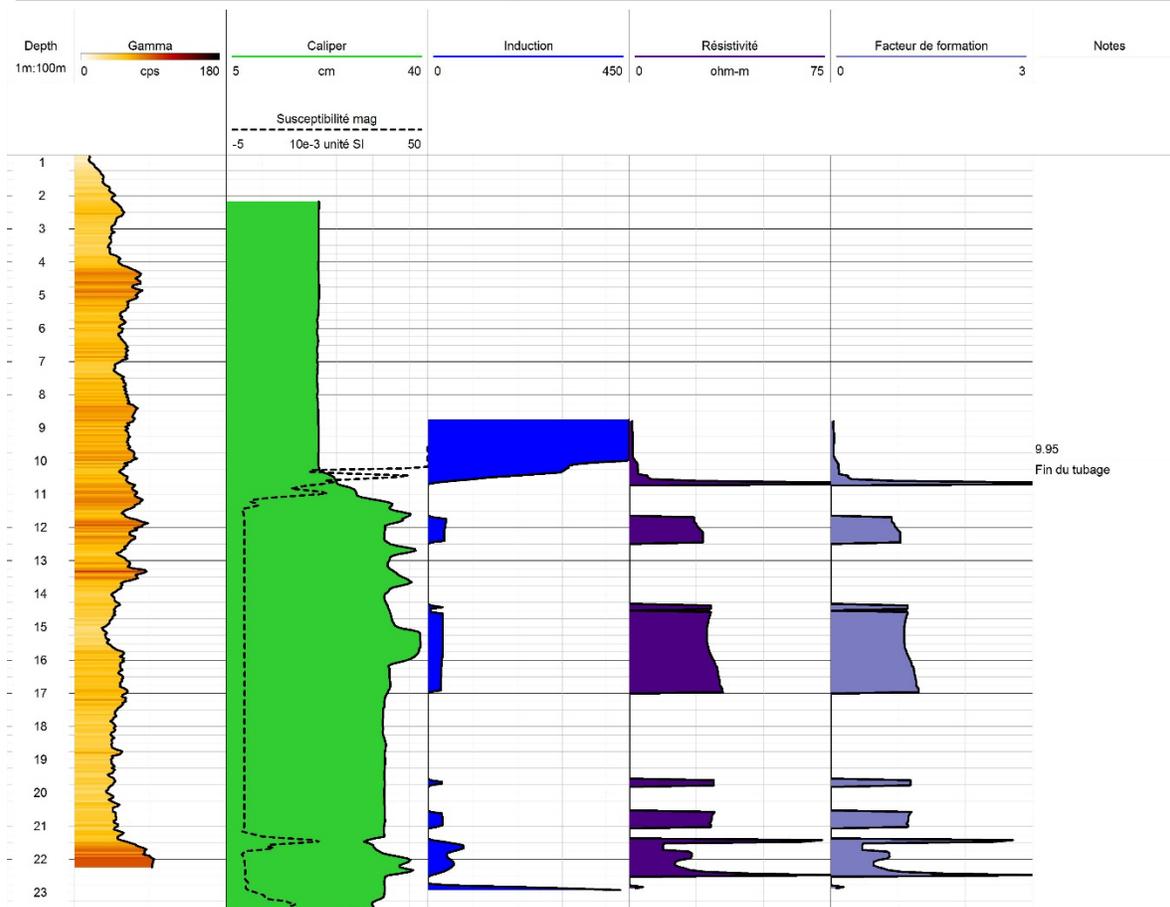
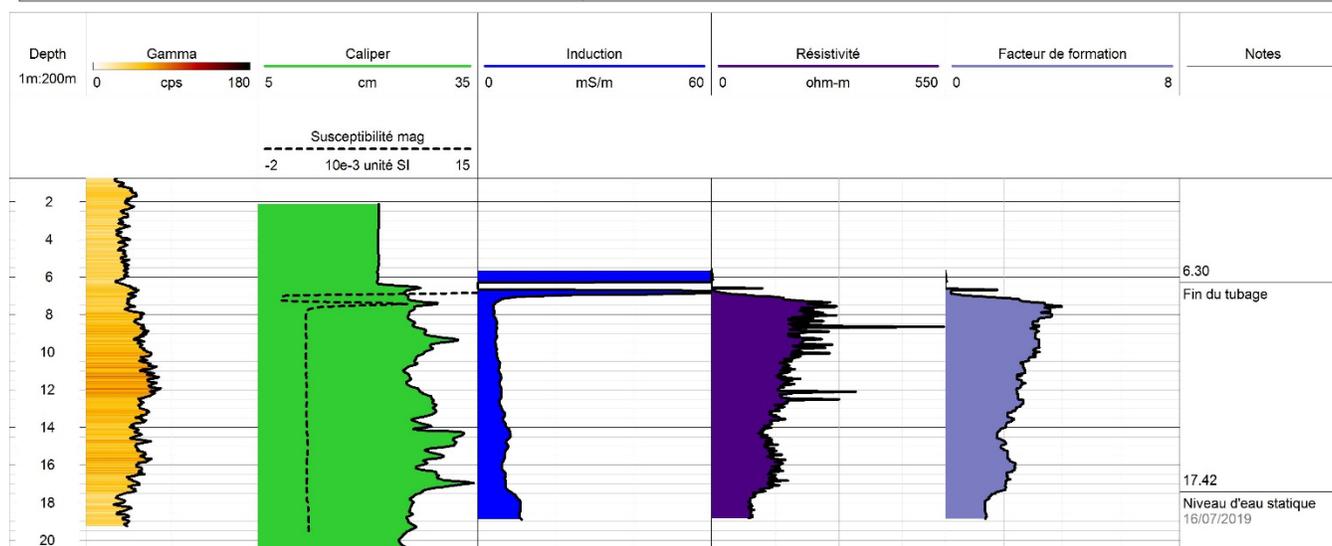


Figure A.42 : Résultats de diagraphie pour le puits PU1-PZ1-13007031

**Île du Havre aux Maisons**

		Geophysical Instrumentation Group																	
Nom du puits: P2-PZ-1 Localisation: Havre-aux-Maisons, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 21.325 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 20.3 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-soi: 60.05 cm															
<b>Description du site:</b> Piézomètre municipal dans l'enclos du captage P2		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 20 m		<b>Notes:</b> Les profils de la deuxième remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons). La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0,5m max. <b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 31/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 14/08/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture indulte</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture indulte
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture indulte																		



**Figure A.43 : Résultats de diagraphie pour le puits P2-PZ-1**

		Geophysical Instrumentation Group			
Nom du puits: PZ-13007042 Localisation: Havre-aux-Maisons, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 69.15 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 20.3 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 33.5 cm	
<b>Description du site:</b> Ancien piézomètre municipal, proche de la clôture du captage P1 le long du chemin de VTT		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 100 m Diagraphie de: 1 m À: 67 m		<b>Notes:</b> Les profils de remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons). La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0.5m max.	
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 22/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 14/08/2019		<b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)		<ul style="list-style-type: none"> <li>0 Zone fissurée / non différenciée</li> <li>1 Diaclase / Fracture ouverte majeure</li> <li>2 Diaclase / Fracture ouverte mineure</li> <li>3 Diaclase / Fracture partiellement ouverte</li> <li>4 Veine / Fracture remplie</li> <li>5 Litage / Foliation / Rubanement</li> <li>6 Fracture indulte</li> </ul>	

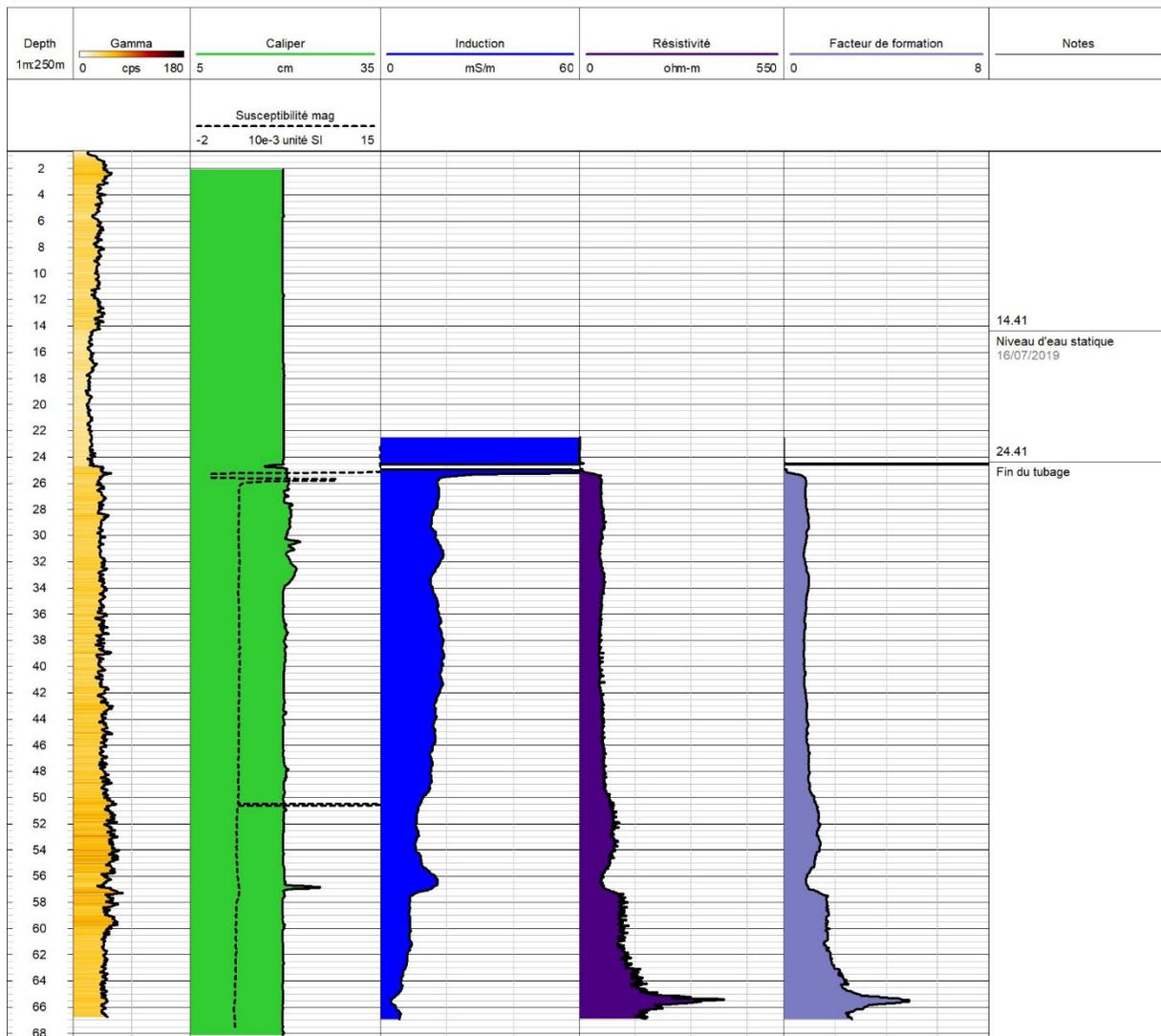


Figure A.44 : Résultats de diagraphie pour le puits PZ-13007042

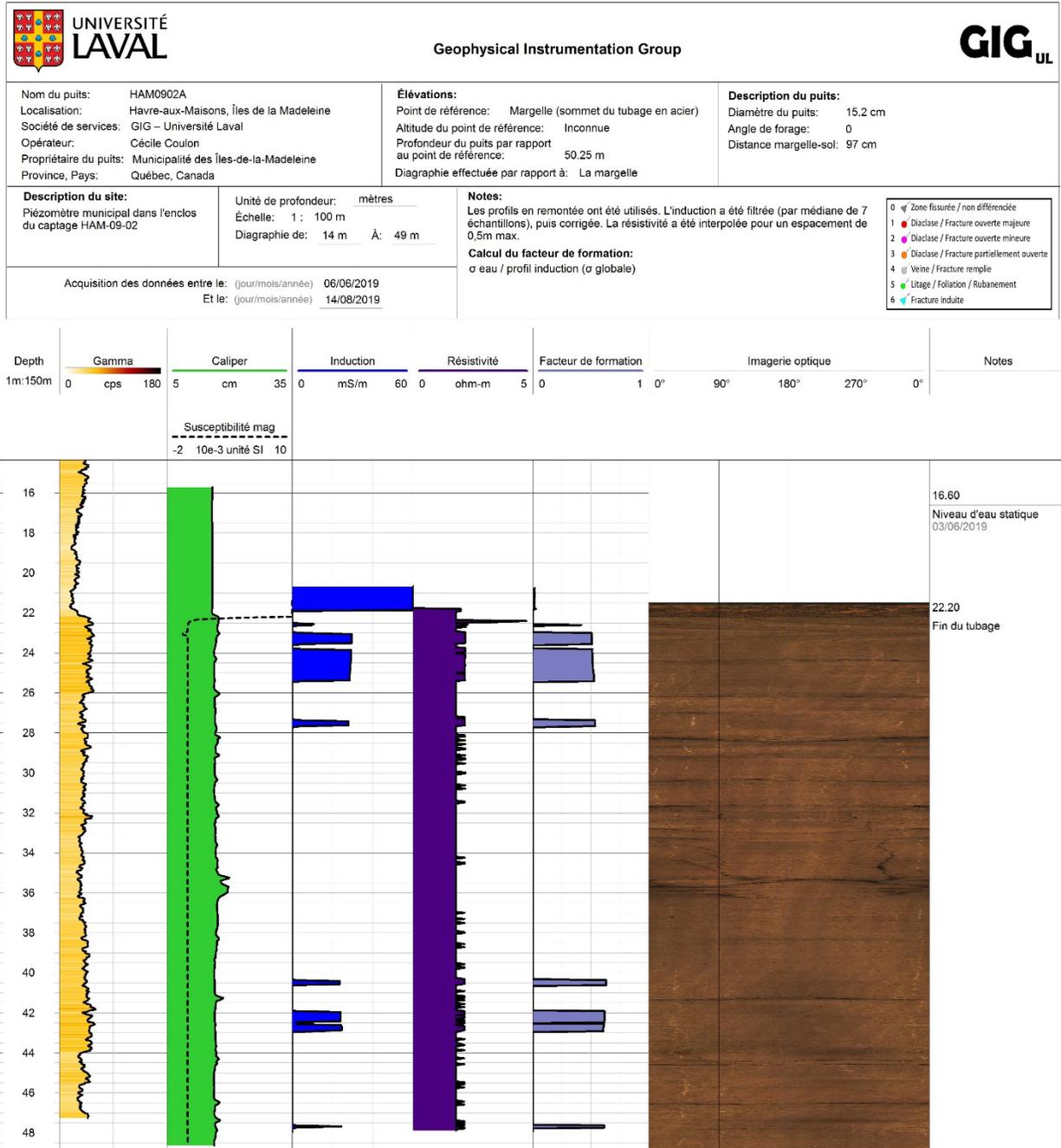


Figure A.45 : Résultats de diagraphie pour le puits HAM-09-02A

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																	
Nom du puits: HAM0901A Localisation: Havre-aux-Maisons, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine Province, Pays: Québec, Canada		Élévations: Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 44.1 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		Description du puits: Diamètre du puits: 15.2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 40 cm															
Description du site: Piézomètre municipal dans l'enclos du captage HAM-09-01		Unité de profondeur: mètres Echelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 43 m		Notes: Les profils en remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons), puis corrigée. La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0,5m max. Calcul du facteur de formation: $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 04/06/2019 Et le: (jour/mois/année) 04/06/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

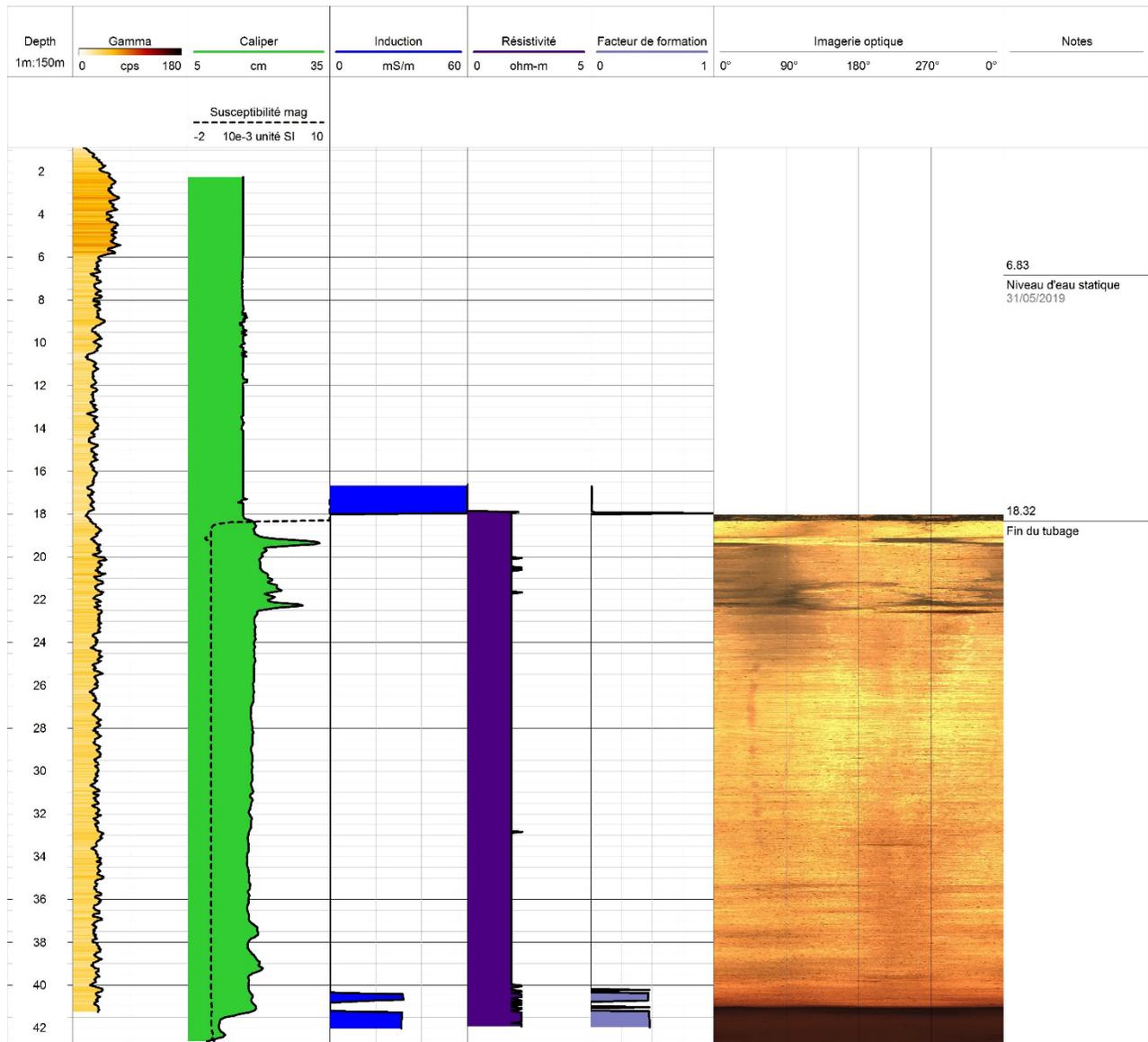


Figure A.46 : Résultats de diagraphie pour le puits HAM-09-01A

		Geophysical Instrumentation Group																	
Nom du puits: IDM001275 Localisation: Havre-aux-Maisons, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Privé Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 87.04 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 15.2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: inconnue															
<b>Description du site:</b> Il s'agit d'un puits privé.		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 300 m Diagraphie de: 6 m À: 86 m		<b>Notes:</b> Les profils de la troisième remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons). La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0.5m max. <b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale) Niveau d'eau statique le 17/07/2019: >30 m															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 31/07/2019 Et le: (jour/mois/année) 31/07/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diabase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diabase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diabase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diabase / Fracture ouverte majeure	2	Diabase / Fracture ouverte mineure	3	Diabase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diabase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diabase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diabase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

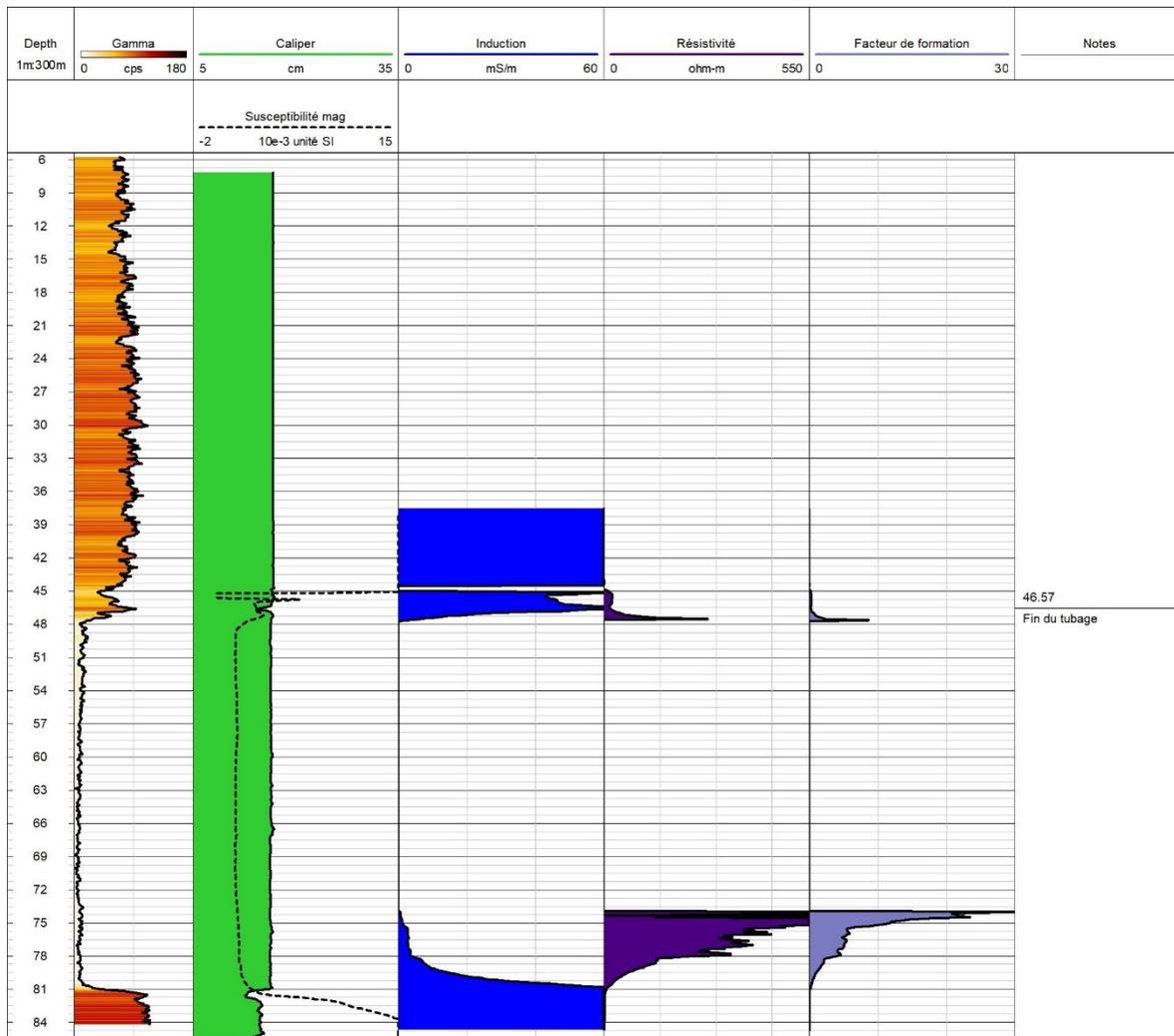


Figure A.47 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM001275

Île du Havre Aubert

		Geophysical Instrumentation Group																	
Nom du puits: IDM001250 Localisation: Havre-Aubert, Îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Privé Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 48.04 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 8 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 50.2 m															
<b>Description du site:</b> Il s'agit d'un puits privé foré dans la dernière année.		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m    A: 47 m		<b>Notes:</b> Induction et Résistivité en remontant. Imagerie optique et Susceptibilité magnétique en descendant. L'induction a été filtrée mais pas corrigée. La résistivité et le gamma ont été interpolés pour un espacement de 0,5m max  <b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 01/08/2019 Et le: (jour/mois/année) 01/08/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture induite</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		

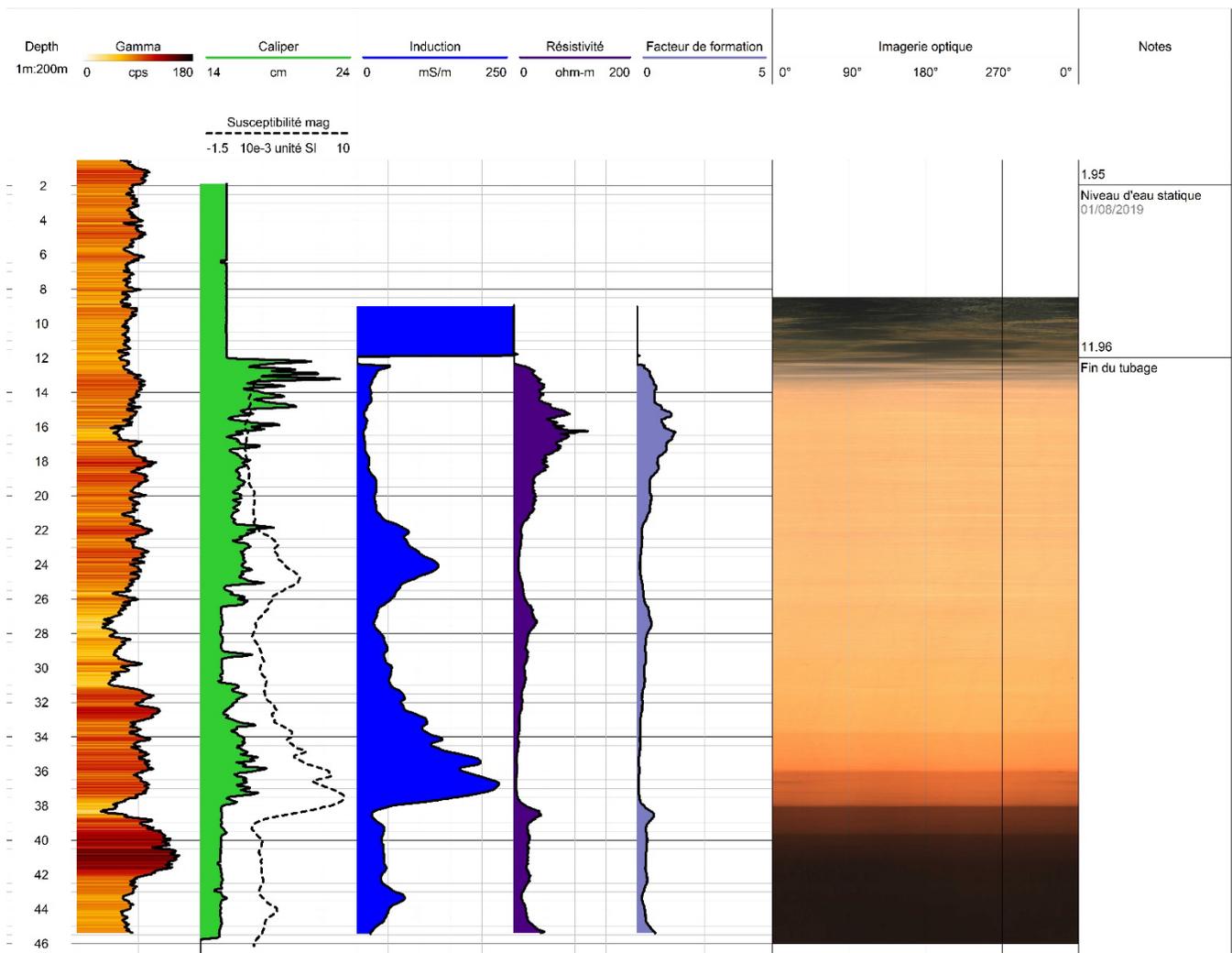


Figure A.48 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM001250

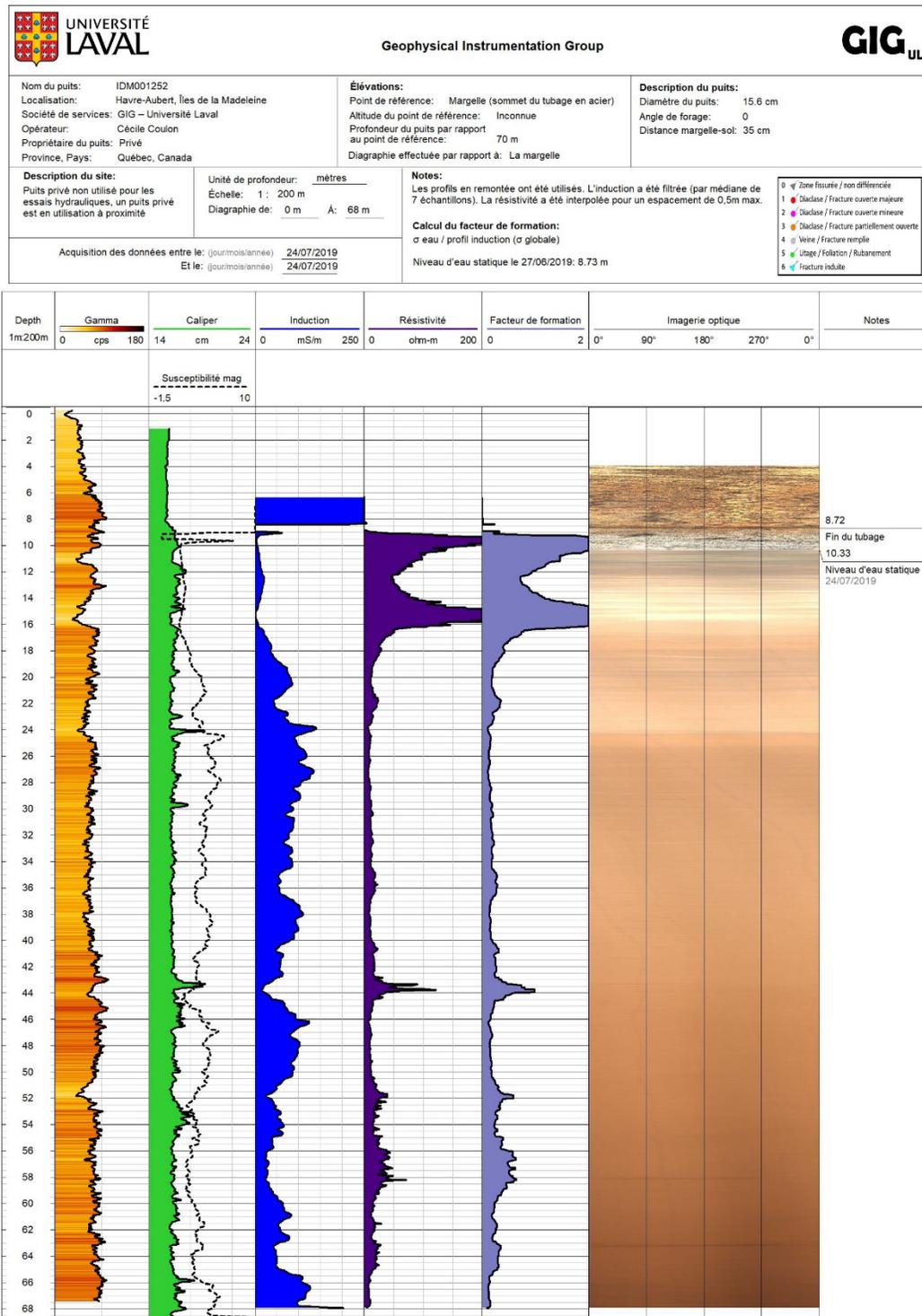


Figure A.49 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM001252

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																	
<b>Nom du puits:</b> P3P4PZ1 <b>Localisation:</b> Havre-Aubert, îles de la Madeleine <b>Société de services:</b> GIG – Université Laval <b>Opérateur:</b> Cécile Coulon <b>Propriétaire du puits:</b> Municipalité des Îles-de-la-Madeleine <b>Province, Pays:</b> Québec, Canada		<b>Élévations:</b> <b>Point de référence:</b> Margelle (sommet du tubage en acier) <b>Altitude du point de référence:</b> Inconnue <b>Profondeur du puits par rapport au point de référence:</b> 63.32 m <b>Diagraphie effectuée par rapport à:</b> La margelle		<b>Description du puits:</b> <b>Diamètre du puits:</b> 15.2 cm <b>Angle de forage:</b> 0 <b>Distance margelle-sol:</b> 40 cm															
<b>Description du site:</b> Pléziomètre municipal dans l'enclos des captages P3 et P4.		<b>Unité de profondeur:</b> mètres <b>Échelle:</b> 1 : 200 m <b>Diagraphie de:</b> 1 m à 62 m		<b>Notes:</b> Les profils en remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée (par médiane de 7 échantillons), puis corrigée. La résistivité a été interpolée pour un espacement de 0,5m max. <b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale) Niveau d'eau statique le 31/05/2019: 23.245 m															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 05/06/2019 Et le: (jour/mois/année) 13/08/2019		<table border="1"> <tr> <td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td> </tr> <tr> <td>1</td><td>Diabase / Fracture ouverte majeure</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>Diabase / Fracture ouverte mineure</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>Diabase / Fracture partiellement ouverte</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>Utage / Foliation / Rubanement</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>Fracture indute</td> </tr> </table>				0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diabase / Fracture ouverte majeure	2	Diabase / Fracture ouverte mineure	3	Diabase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Utage / Foliation / Rubanement	6	Fracture indute
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diabase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diabase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diabase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Utage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture indute																		

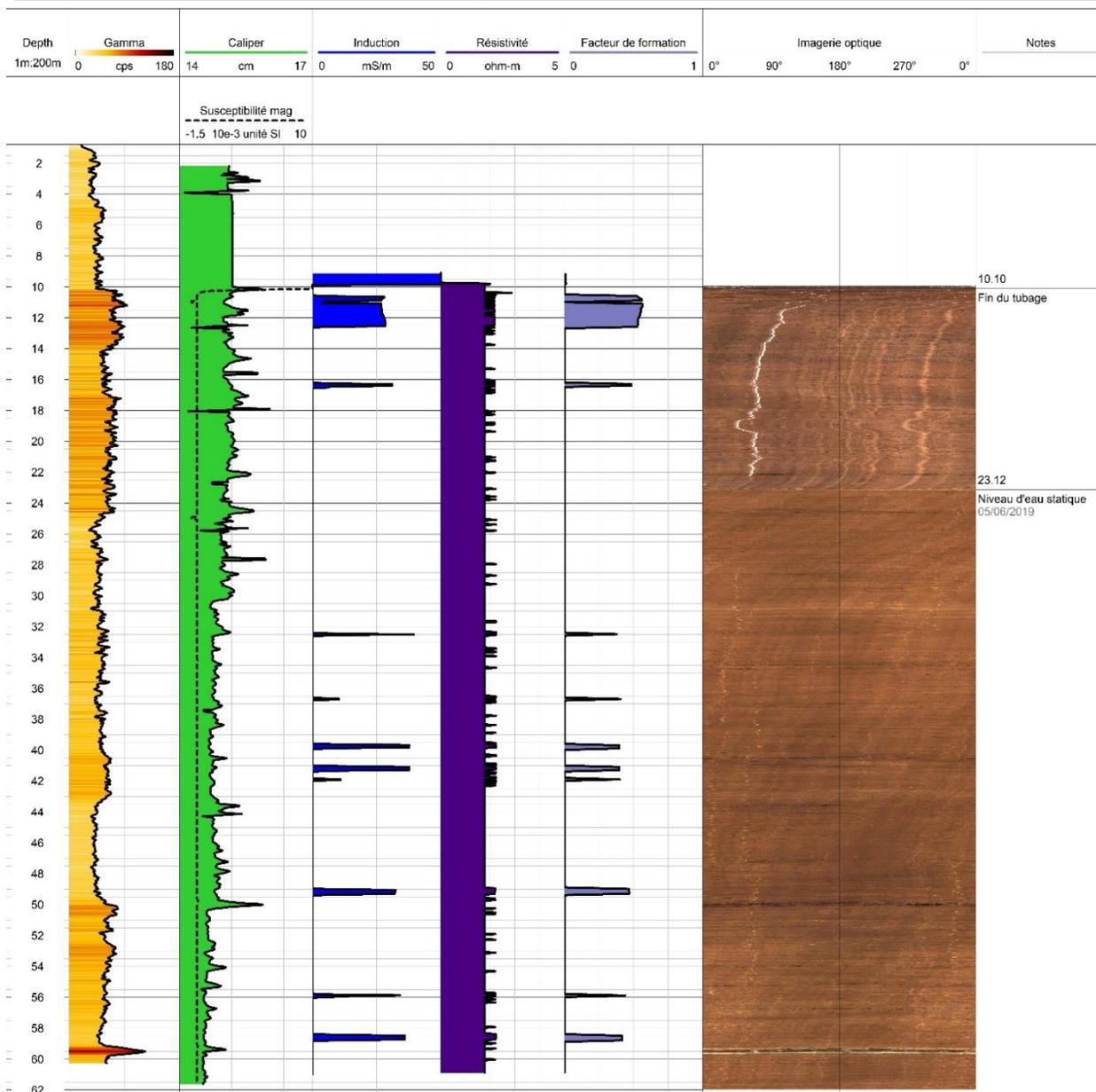
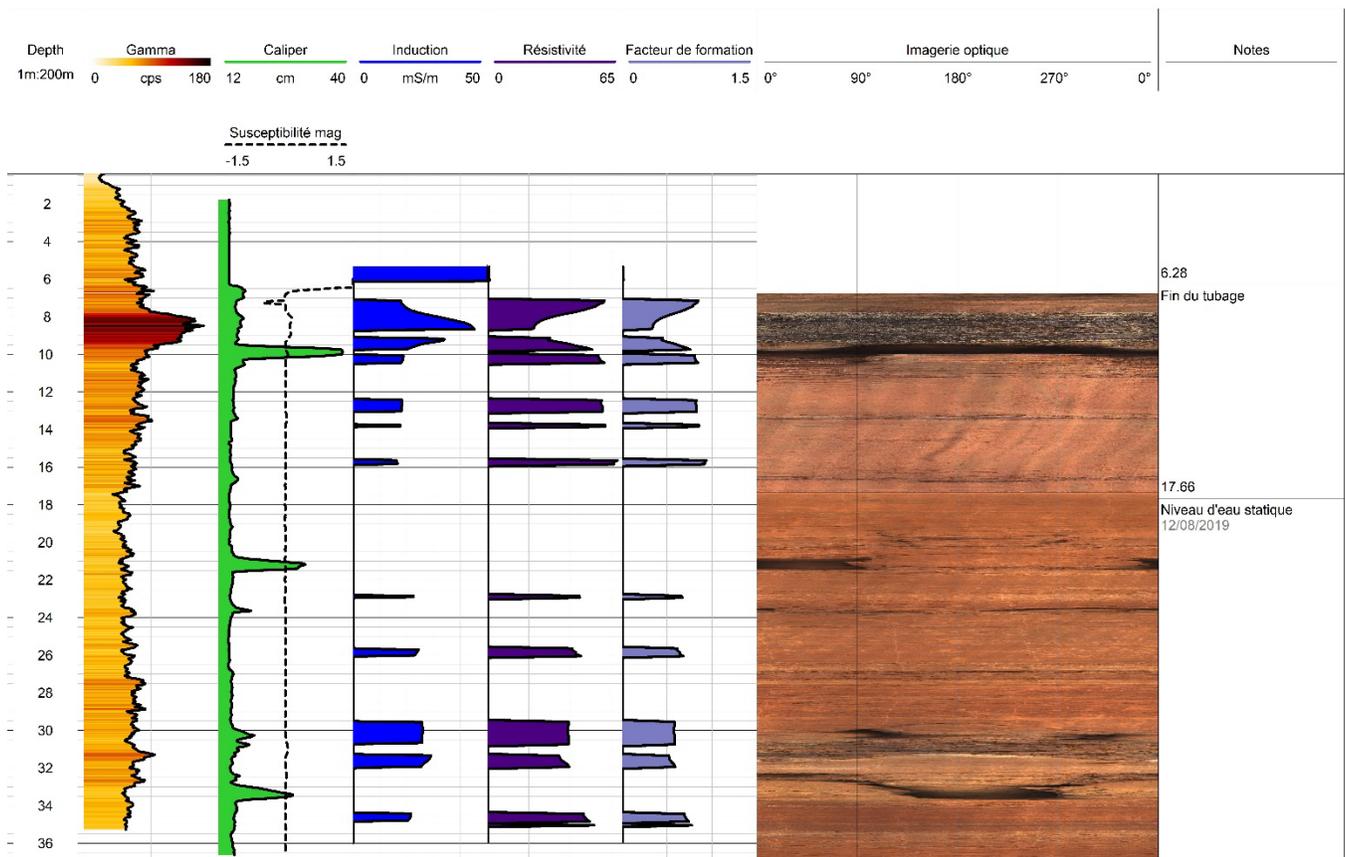


Figure A.50 : Résultats de diagraphie pour le puits P3P4-PZ1

**La Grosse Île**

		<b>Geophysical Instrumentation Group</b>																	
Nom du puits: IDM000665 Localisation: Grosse Île, Îles de la Madeleine Société de services: GIG - Université Laval Opérateur: Cécile Coulon Propriétaire du puits: Privé Province, Pays: Québec, Canada		<b>Élévations:</b> Point de référence: Margelle (sommet du tubage en acier) Altitude du point de référence: Inconnue Profondeur du puits par rapport au point de référence: 37 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		<b>Description du puits:</b> Diamètre du puits: 16.03 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 93 cm															
<b>Description du site:</b> Situé aux abords d'un champs.		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 1 m À: 37 m		<b>Notes:</b> Tous les profils en remontée ont été utilisés. L'induction a été filtrée et corrigée. La résistivité a été recalculée à partir de l'induction corrigée. Le profil de Gamma a été interpolé pour un espacement de 0,5 m max.															
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) 04/06/2019 Et le: (jour/mois/année) 04/06/2019		<b>Calcul du facteur de formation:</b> $\sigma$ eau / profil induction ( $\sigma$ globale)		<table border="1"> <tr><td>0</td><td>Zone fissurée / non différenciée</td></tr> <tr><td>1</td><td>Diaclase / Fracture ouverte majeure</td></tr> <tr><td>2</td><td>Diaclase / Fracture ouverte mineure</td></tr> <tr><td>3</td><td>Diaclase / Fracture partiellement ouverte</td></tr> <tr><td>4</td><td>Veine / Fracture remplie</td></tr> <tr><td>5</td><td>Litage / Foliation / Rubanement</td></tr> <tr><td>6</td><td>Fracture induite</td></tr> </table>		0	Zone fissurée / non différenciée	1	Diaclase / Fracture ouverte majeure	2	Diaclase / Fracture ouverte mineure	3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte	4	Veine / Fracture remplie	5	Litage / Foliation / Rubanement	6	Fracture induite
0	Zone fissurée / non différenciée																		
1	Diaclase / Fracture ouverte majeure																		
2	Diaclase / Fracture ouverte mineure																		
3	Diaclase / Fracture partiellement ouverte																		
4	Veine / Fracture remplie																		
5	Litage / Foliation / Rubanement																		
6	Fracture induite																		



**Figure A.51 : Résultats de diagraphie pour le puits IDM000665**

Île de la Grande Entrée

		Geophysical Instrumentation Group			
Nom du puits: GE-01 Localisation: Grande-Entrée, îles de la Madeleine Société de services: GIG – Université Laval Opérateur: Inconnu Propriétaire du puits: MELCC Province, Pays: Québec, Canada		Élévations: Point de référence: Margelle Altitude du point de référence: 9.738 m Profondeur du puits par rapport au point de référence: 86.33 m Diagraphie effectuée par rapport à: La margelle		Description du puits: Diamètre du puits: 10.2 cm Angle de forage: 0 Distance margelle-sol: 0.47 m	
Description du site: Situé à l'école de l'île de Grande-Entrée.		Unité de profondeur: mètres Échelle: 1 : 200 m Diagraphie de: 24.54 m À: 85.84 m		Notes: Profondeur du tubage/ margelle = 24.77 m Profondeur de l'eau / margelle = 9.16 m le 2019-09-17 Calcul du facteur de formation: Calculé par Christian pre-PACES	
Acquisition des données entre le: (jour/mois/année) XXXX/2017 Et le: (jour/mois/année) 26/05/2019		0 Zone fissurée / non différenciée 1 Diaclase / Fracture ouverte majeure 2 Diaclase / Fracture ouverte mineure 3 Diaclase / Fracture partiellement ouverte 4 Veine / Fracture remplie 5 Litage / Foliation / Rubanement 6 Fracture indulte			

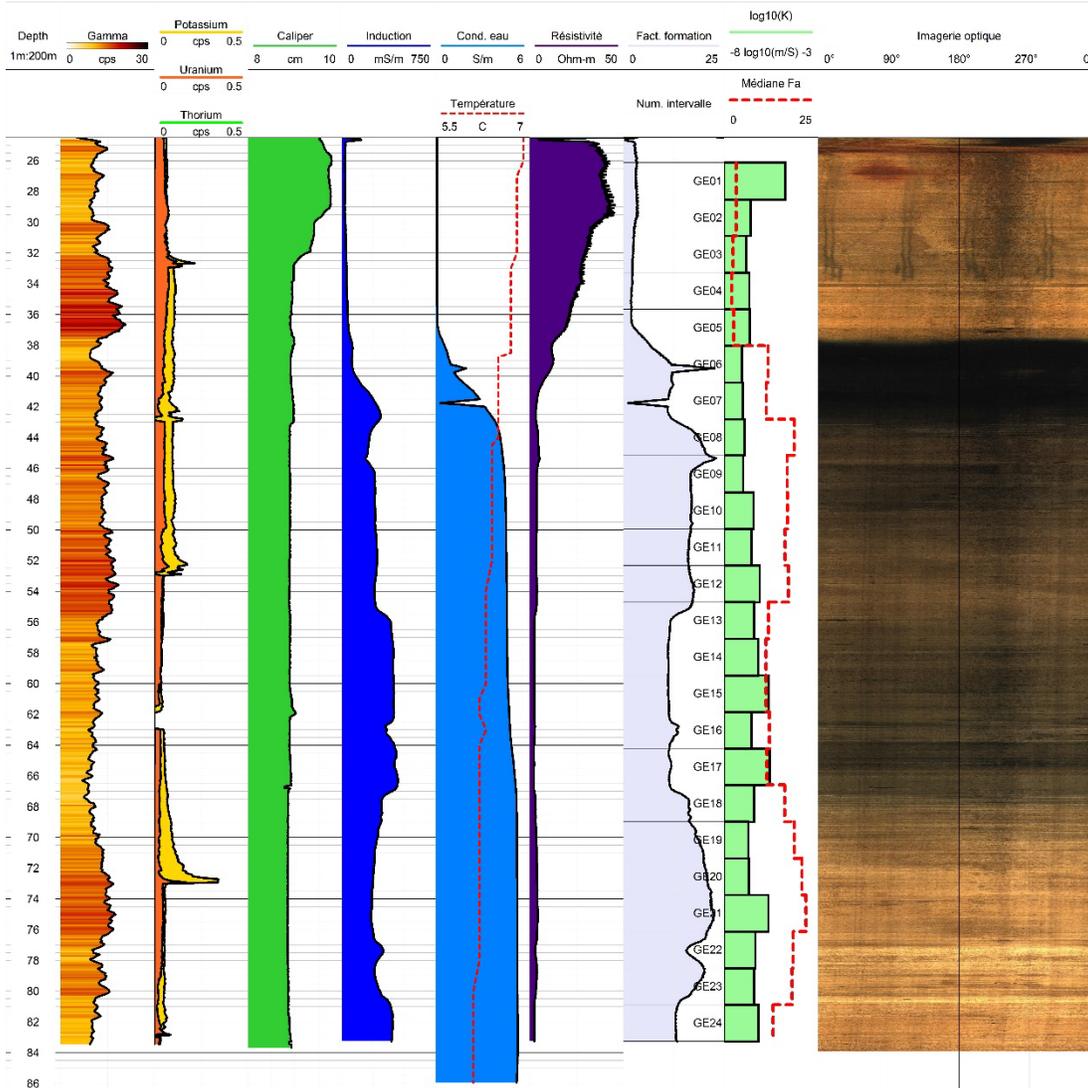


Figure A.52 : Résultats de diagraphie pour le puits GE-01

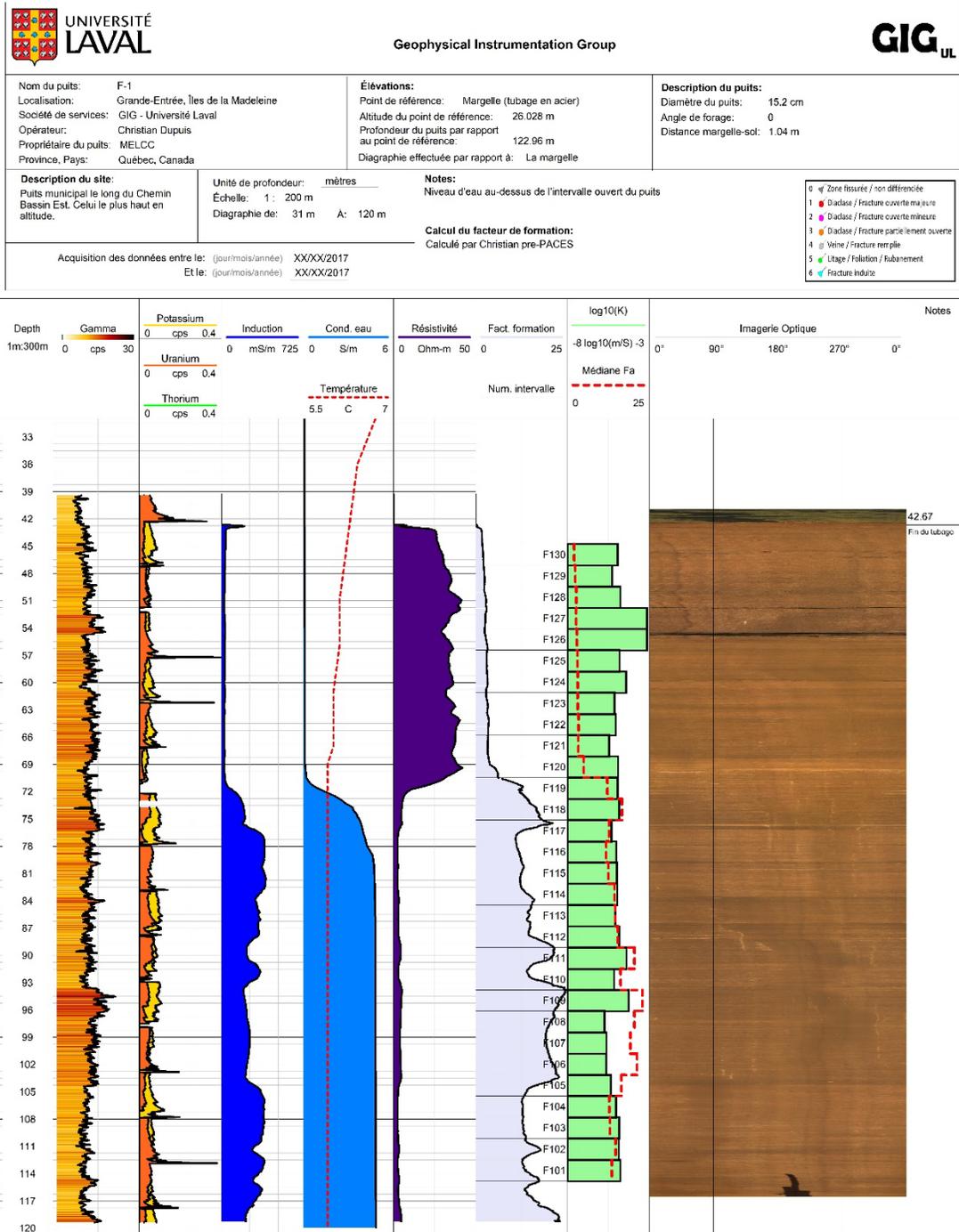


Figure A.53 : Résultats de diagraphie pour le puits F-1

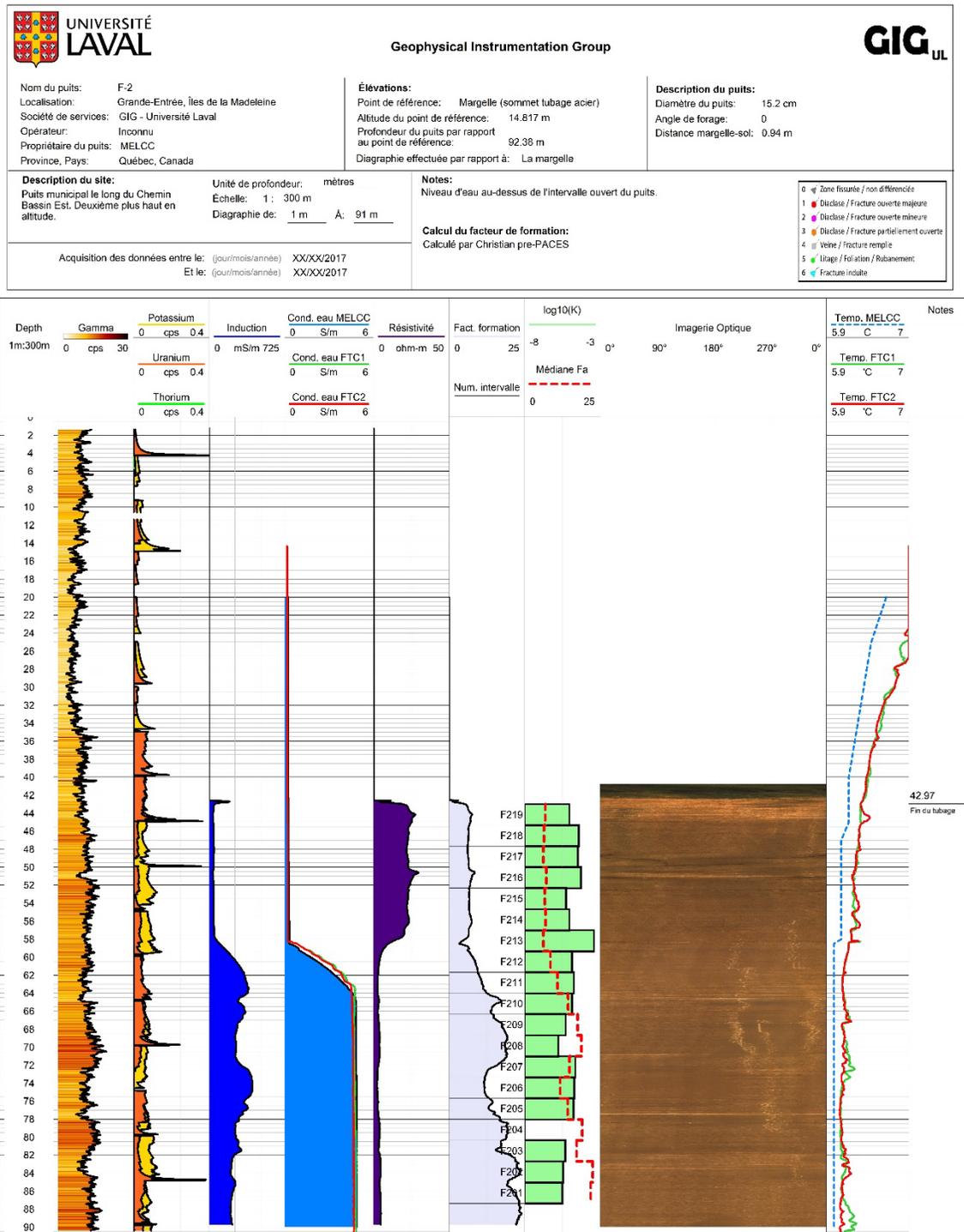


Figure A.54 : Résultats de diagraphie pour le puits F-2

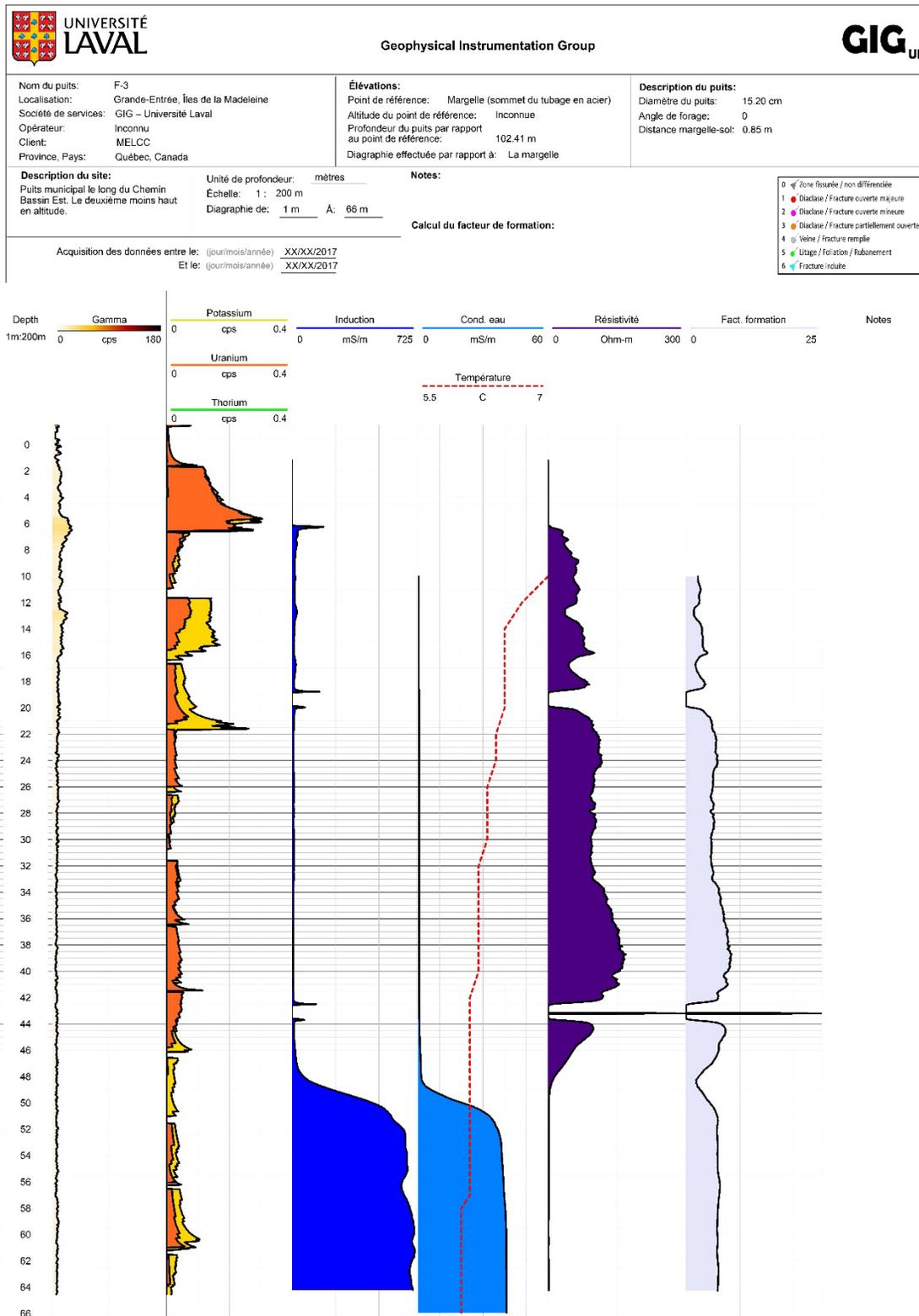


Figure A.55 : Résultats de diagraphie pour le puits F-3

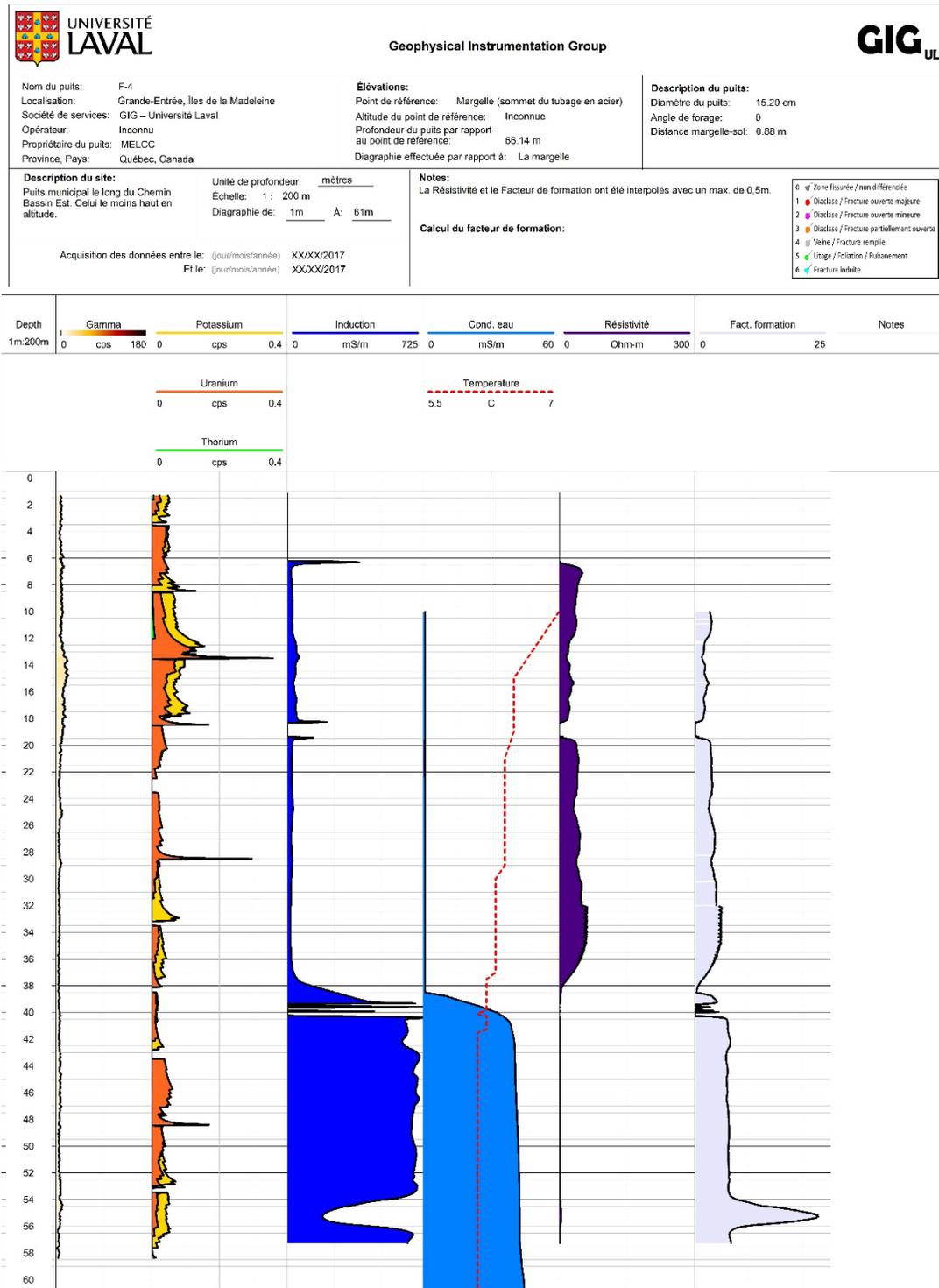


Figure A.56 : Résultats de diagraphie pour le puits F-4

**Annexe 6 : Cotes de fiabilité et critères de validation de la base de données hydrogéologiques**

### ***Cotes de fiabilité***

Le Tableau A.26 présente une description pour chaque valeur attribuée aux cotes de fiabilité ainsi que le nombre d'objets de la base de données hydrogéologiques qui lui est attribué.

Les cotes de fiabilité en lien avec la localisation englobent cinq critères. Dans un premier temps, la fiabilité sur la source des coordonnées géographiques (FL1) informe sur la provenance de l'information et indique si une erreur évidente a été constatée et corrigée.

Le degré d'incertitude sur les coordonnées géographiques (FL2) renseigne sur la précision de celles-ci lorsqu'elles sont rapportées de la source. Les coordonnées sont réputées être plus fiables lorsqu'elles ont été mesurées par arpentage ou à l'aide d'un GPS et moins fiables lorsqu'elles ont été géoréférencées à partir d'une carte ou d'une localisation visuelle.

Le degré d'incertitude sur le géoréférencement (FL3-A) consiste en une évaluation effectuée par la personne ayant procédé au géoréférencement de l'objet. Un géoréférencement excellent est attribué lorsque le géoréférencement s'est fait facilement par géocodage ou à partir d'une carte à grande échelle et très détaillée. Inversement, un géoréférencement acceptable indique que la procédure s'est avérée ardue et que la carte utilisée avait une petite échelle et était peu détaillée.

Le degré d'incertitude sur la localisation visuelle (FL3-B) est divisé en fonction de l'échelle des plans accompagnant les rapports techniques et contenant des repères visuels (ex. : rivière, route, etc.) permettant d'estimer la localisation des objets. Une plus grande échelle représente un degré d'incertitude élevé et une plus petite échelle un degré d'incertitude faible.

Le degré d'incertitude de l'élévation (FL4) est réputé être plus fiable lorsque l'élévation a été mesurée par nivellement ou à l'aide d'un GPS et moins fiable lorsqu'elle est extraite par géoréférencement.

Concernant la qualité reliée à la source de l'information, deux critères sont évalués. On retrouve en premier la provenance de l'information (FS1). Pour ce critère, les données mesurées par l'Université Laval dans le cadre du portrait des ressources en eau souterraine sont considérées comme les plus fiables, viennent ensuite par ordre décroissant de fiabilité les données extraites des rapports techniques, les données provenant de diverses compilations et les données du SIH. Une dernière cote informe sur l'accessibilité des données sources (FS2), à savoir si les valeurs des observations de l'objet peuvent être vérifiées à l'aide des documents sources ou non.

**Tableau A.26 : Synthèse des valeurs de cotes de fiabilité associées aux objets de la base de données hydrogéologiques**

Cote de fiabilité	Description	Valeurs possibles		Objet	
				Nombre	%
LOCALISATION	FL1 Source des coordonnées	1	Nouvelles coordonnées prises sur le terrain dans le cadre du projet	23	1,2
		2	Les coordonnées proviennent du document source (coordonnées fournies ou extraites d'une carte présente dans le document)	1 819	98,8
		3	Erreur évidente dans les coordonnées sources (ex.: Y= 5 332 444 au lieu de 5 232 444). L'erreur a été corrigée.	0	0,0
	FL2 Degré d'incertitude sur les coordonnées XY	1	Précision entre 0m et 1m (ex : GPS haute précision, arpentage)	193	10,5
		2	Précision entre 1m et 10m (ex. : GPS simple)	152	8,2
		3	Précision entre 10m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	449	24,4
		4	Inconnu	1 048	56,9
	FL3-A Degré d'incertitude sur le géoréférencement par géocodage ou à partir d'une carte	1	Les coordonnées XY fournies	1 183	64,2
		2	Géoréférencement excellent	0	0
		3	Géoréférencement bon	383	20,8
		4	Géoréférencement acceptable	274	14,9
		5	Aucun géoréférencement, localisation visuelle	2	0,1
	FL3-B Degré d'incertitude sur la localisation visuelle	1	Les coordonnées XY fournies ou carte géoréférencée	1 840	99,9
		2	Carte grande échelle (1:20 000 et plus grand) lorsque le géoréférencement est impossible	0	0
		3	Carte moyenne échelle (1:50 000) lorsque le géoréférencement est impossible	0	0
		4	Carte petite échelle (1:100 000 et plus petit) lorsque le géoréférencement est impossible	0	0
		5	Repères visuels peu fiables ou inexistants (ex.: plan) lorsque le géoréférencement est impossible	2	0,1
	FL4 Degré d'incertitude de l'élévation (Z)	1	Précision entre 0m et 1m (ex : GPS haute précision, arpentage)	414	22,5
		2	Précision entre 1m et 20m (ex. : GPS simple)	0	0
		3	Précision entre 20m et 100 m (ex. : extraites par géoréférencement d'une carte, extraites d'une carte topographique, localisation visuelle)	918	49,8
4		Inconnu	510	27,7	
SOURCE	FS1 Provenance de l'information (Descriptive, stratigraphique et technique)	1	Forages réalisés dans le cadre du projet	70	3,8
		2	Données extraites de rapports techniques obtenus dans le cadre du projet	1 044	56,7
		3	Données extraites d'une compilation de données de même source (ex.: MTQ)	51	2,8
		4	Données extraites d'une compilation de sources multiples (ex.: GUHS)	383	20,8
		5	SIH	294	16,0
		6	Source de données douteuses	0	0
	FS2 Accessibilité des données sources (rapports originaux)	1	Les valeurs ont été vérifiées à l'aide des données sources	1 112	60,4
		2	Les valeurs ne peuvent être vérifiées à l'aide des données sources (source non disponible)	730	39,6

### ***Cotes de validation***

Le Tableau A.27 fait la synthèse des valeurs des critères de validation associés aux objets (ex. puits, piézomètre, affleurement) de la base de données hydrogéologiques alors que le Tableau A.28 traite des valeurs des critères de validation associés aux observations (ex. niveau d'eau, paramètres hydrogéologiques, analyses géochimiques) de la base de données.

La cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique (VL1) est déterminée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) en repérant les objets situés dans un cours d'eau ou un plan d'eau.

La cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec les zones d'affleurement et de till mince de la Carte 18 : Géologie des formations superficielles, en annexe électronique, est également évaluée (VL2). Cela est fait en vérifiant si un forage indique une faible épaisseur de dépôts meubles lorsque localisé dans un polygone d'affleurement ou de till mince.

Les élévations estimées par le modèle numérique de terrain (VL3) sont employées pour les objets dans les analyses hydrogéologiques lorsque l'élévation de l'objet n'était pas connue. Toutefois, la cohérence des altitudes rapportées par la source des données avec le modèle numérique de terrain demeure importante, car elle peut renseigner sur l'exactitude de la localisation de l'objet.

Le critère portant sur la cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des séquences stratigraphiques (VT1) permet de constater des erreurs possibles des informations stratigraphiques.

La cohérence de la stratigraphie (VT2) s'effectue en vérifiant si la description stratigraphique du forage respecte la séquence logique d'une unité de dépôts meubles au-dessus d'une unité de roc, et non le contraire.

Le dernier critère de validation associé aux objets concerne l'identification des doublons (VT3). Afin de ne pas utiliser deux fois la même donnée dans les analyses hydrogéologiques et ainsi de ne pas attribuer un poids artificiellement trop élevé à une même donnée, les doublons sont identifiés à l'aide de la localisation des forages et de leur description stratigraphique. La méthode utilisée correspond à celle décrite en détail dans le Protocole de fiabilité et de validation des données de forage.

Le critère de validation sur la cohérence des niveaux d'eau (VT4) s'applique à chaque observation (ou mesure de niveau d'eau) en comparant la profondeur du niveau statique avec la profondeur du niveau dynamique et la profondeur totale du puits.

Les informations associées aux essais hydrauliques sont évaluées par le critère portant sur la cohérence des paramètres hydrogéologiques et des informations servant à estimer la transmissivité des aquifères (VT5). Ce critère s'assure que les paramètres hydrogéologiques rapportés de la source ne se contredisent pas. Il indique également si suffisamment d'informations sont disponibles pour estimer la transmissivité, soit le débit pompé, la durée du pompage et les niveaux d'eau statiques et dynamiques.

Le seul critère de validation de type scientifique porte sur la balance ionique (ou balance électronique) des analyses géochimiques des échantillons d'eau (VS1). Celle-ci se calcule à partir des concentrations en éléments majeurs (anions et cations) et permet d'évaluer la qualité des analyses. Les échantillons

ayant une valeur de balance ionique se situant dans l'intervalle de  $\pm 10\%$  sont considérés comme adéquats pour les interprétations de la qualité de l'eau, l'estimation de la dureté et de la matière dissoute totale, ainsi que pour la définition des faciès géochimiques (types d'eau). Ceux en dehors de l'intervalle de bilan ionique acceptable peuvent être utilisés seulement pour établir la qualité de l'eau, mais tout en conservant un regard critique sur le sodium (Na), les chlorures (Cl) et les sulfates (SO<sub>4</sub>).

**Tableau A.27 : Synthèse des valeurs de cotes de validation associées aux objets de la base de données hydrogéologiques**

	Critère de validation	Description	Valeurs possibles		Objet	
					Nombre	%
LOCALISATION	VL1	Cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique	1	Aucun conflit spatial identifié	1 761	95,6
			2	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais localisation adéquate	44	2,4
			3	Forages situés à l'extérieur d'un polygone du réseau hydrographique et dont la première unité stratigraphique ou le type de captage indique que le forage ou la station d'échantillonnage est dans l'eau, mais localisation adéquate	0	0,0
			4	Conflit spatial avec le réseau hydrographique, mais moins de 10 m de la rive	15	0,8
			5	Forages situés à l'extérieur d'un polygone du réseau hydrographique et dont la première unité stratigraphique indique que le forage est dans l'eau, mais localisation inadéquate	0	0,0
			6	Conflit spatial avec le réseau hydrographique (à l'intérieur d'un polygone du réseau hydrographique; localisation potentiellement incorrecte et non vérifiable), à plus de 10 m de la rive	22	1,2
	VL2	Cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec la cartographie des zones d'affleurement et de till mince.	1	Le forage est situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montre une épaisseur de dépôts de [0, 5[ m.	533	28,9
			2	Le forage est situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montre une épaisseur de dépôts de [5, 10[ m.	15	0,8
			3	Le forage est situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince et montre une épaisseur de dépôts > 10 m.	15	0,8
			4	Le forage n'est PAS situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince.	609	33,1
			5	Le forage est situé à l'extérieur de la zone cartographiée.	34	1,8
			6	Le forage ne contient pas de descriptions stratigraphiques	636	34,5
			7	Non validé	0	0,0
	VL3	Cohérence des altitudes avec le modèle numérique de terrain	1	Différence $\leq$ 1 m	404	21,9
			2	Différence de ] 1, 20] m	116	6,3
			3	Altitude source disponible, mais localisation à l'extérieur du cadre du MNT	0	0,0
			4	Altitude source non disponible, mais localisation à l'intérieur du cadre du MNT	1 281	69,5
			5	Altitude source non disponible et localisation à l'extérieur du cadre du MNT	40	2,2
			6	Différence > 20 m	1	0,1

**Tableau A.27 : Synthèse des valeurs de cotes de validation associées aux objets de la base de données hydrogéologiques (suite)**

	Critère de validation	Description	Valeurs possibles		Objet	
					Nombre	Nombre
<b>TECHNIQUE</b>	VT1	Cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des couches stratigraphiques	1	Différence $\leq$ 1 m	823	44,7
			2	Profondeur non disponible, mais épaisseur des couches stratigraphiques disponible	0	0,0
			3	Profondeur disponible, mais épaisseur des couches stratigraphiques non disponible	353	19,2
			4	Profondeur et épaisseur des couches stratigraphiques non disponibles	663	36,0
			5	Différence $>$ 1 m	3	0,2
	VT2	Cohérence de la stratigraphie	1	Les dépôts meubles sont toujours au-dessus du roc (lorsque le roc est identifié en forage) ou le roc n'a pas été rencontré en forage	823	44,7
			2	Le code du faciès dominant montre une séquence de roc au-dessus des dépôts meubles	3	0,2
			3	Le forage ne contient pas de descriptions stratigraphiques	1 016	55,2
	VT3	Doublons	1	Aucun doublon stratigraphique "Certain" n'a été identifié. Lorsque l'identification du doublon était "Probable", les deux objets ont été conservés.	226	12,3
			2	Un ou plusieurs doublons stratigraphiques "Certain" en lien avec cet objet ont été identifiés. Uniquement la description stratigraphique de cet objet a été CONSERVÉE.	83	4,5
			3	Un ou plusieurs doublons stratigraphiques "Certain" en lien avec cet objet ont été identifiés. La description stratigraphique de cet objet a été REJETÉE.	0	0,0
			4	Le forage ne contient pas de descriptions stratigraphiques	1 016	55,2
			5	Le forage contient une description stratigraphique, mais aucun doublon stratigraphique "Certain" ou "Probable" identifié.	517	28,1

**Tableau A.28 : Synthèse des valeurs des critères de validation associés aux observations de la base de données hydrogéologiques**

Cote de fiabilité	Description	Valeurs possibles		Objet			
				Nombre	%		
TECHNIQUE	VT4	Cohérence de la profondeur des niveaux d'eau : comparaison de la profondeur du niveau d'eau statique avec la profondeur totale du puits et la profondeur du niveau dynamique	1	Niveau statique < Profondeur du puits et Niveau statique < Niveau dynamique	79 023	6,8	
			2	Niveau statique < Profondeur du puits, mais Niveau dynamique non disponible	14 879	1,3	
			3	Niveau statique < Niveau dynamique, mais Profondeur du puits non disponible	2 370	0,2	
			4	Profondeur du puits et Niveau dynamique non disponible	52	0,0	
			5	Pas un niveau statique (niveau dynamique)	1 006 768	86,6	
			6	Niveau statique > Profondeur du puits	32	0,0	
			7	Niveau statique > Niveau dynamique	59 545	5,1	
	VT5	Cohérence des paramètres hydrogéologiques et des informations servant à estimer la transmissivité	1	Au moins 1 paramètre hydrogéologique rapporté de la source ( $S$ , $C_s$ , $T$ ou $K$ )	809	81,6	
			2	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source, mais suffisamment d'information pour estimer la transmissivité ( $Q$ , $t$ , $\Delta s$ )	43	4,3	
			3	Au moins 1 paramètre hydrogéologique rapporté de la source jugé aberrant	15	1,5	
			4	Au moins 1 information pour estimer la transmissivité jugée aberrante	0	0,0	
			5	Aucun paramètre hydrogéologique rapporté de la source et insuffisamment d'information pour estimer la transmissivité	124	12,5	
	SCIENTIFIQUE	VS1	Balance ionique des analyses géochimiques	1	Balance ionique $\leq 5\%$	68	0,05
				2	Balance ionique $> 5\%$ et $\leq 10\%$	42	0,03
3				Balance ionique $> 10\%$	60	0,05	
4				Données insuffisantes pour le calcul de la balance ionique	131 696	99,87	

## **Annexe 7 : Contenu de la base de données bibliographiques**

No. du rapport	Référence
RM0001	BPR Groupe-Conseil (2011). <i>Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Mise aux normes des installations de production d'eau potable étude : Étude préliminaire</i> , Charny (Qc), BPR Groupe-Conseil, n°M69-07-84, 38 p. et annexes.
RM0002	BPR Ingénieurs-Conseils (1996). <i>Municipalité des l'Île-du-Havre-Aubert, Alimentation en eau potable : Étude préliminaire</i> , Québec (Qc), BPR Ingénieurs-Conseils, n°M69-95-23, 18 p. et annexes.
RM0003	Martel, R., Calderhead, A., Tranquille, A.-G., Deschênes-Rancourt, C., Ballard, J.-M. et Lévesque, R. (2015). <i>Caractérisation hydrogéologique dans le cadre du suivi de la qualité des eaux souterraines au site de l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules</i> , Québec (Qc), INRS-ETE, n°R1648, 68 p. et annexes.
RM0004	WSP (2017). <i>Forages et aménagement de puits d'observation : Centrale thermique de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine (Québec)</i> , Québec (Qc), WSP Canada Inc., Rapport produit pour Hydro-Québec, n°161-06062-08, 20 p. et annexes.
RM0005	WSP (2018). <i>Caractérisation des sols et de l'eau souterraine. Centrale thermique de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine (Québec)</i> , Québec (Qc), WSP Canada Inc, Rapport produit pour Hydro-Québec, n°171-15168-00, 41 p. et annexes.
RM0006	Lachance, M., Verreault, G., Coté, L., Harvey, B.-P., Bertrand, P., Vigneault, Y., Désilets, L., Crispin, M. et Tremblay, R. (1993). <i>Développement de cartes thématiques aux Îles-de-la-Madeleine: Cartographie de systèmes côtiers et élaboration du système de gestion de base des données</i> , Québec, INRS-Eau, n°368, 93 p. et annexes.
RM0007	Martel, R., Calderhead, A., Paradis, D., Ahad, J., Gosselin, J.S. et Deschênes-Rancourt, C. (2017). <i>Caractérisation hydrogéologique complémentaire dans le cadre du suivi de la qualité des eaux souterraines au site de l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules</i> , Québec, INRS-ETE, n°R-1728, 72 p. et annexes.
RM0008	Englobe (2016). <i>Rapport d'étude pédologique et de caractérisation environnementale : Intersection 199-01-040, 199-01-050 et 99760-01-00 Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Étang-du-Nord)</i> , Québec, Englobe, n°073-P-0008180-0-34-104-GE-R-0001-00, 21 p. et annexes.
RM0009	MTQ (2005). <i>Étude pédologique préliminaire : Chemin du Grand-Ruisseau, Les Îles-de-la-Madeleine (districts de Cap-aux-Meules et Fatima)</i> , Rimouski (Qc), Ministère des Transports du Gouvernement du Québec, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, Service des projets, Sols et matériaux, n°20-3171-8607-B, 9 p. et annexes.
RM0010	MTQ (2002). <i>Étude pédologique : Route 199-01-061, 070 Les îles-de-la-Madeleine (districts de Cap-aux-Meules et Fatima)</i> , Rimouski (Qc), Ministère des Transports du Gouvernement du Québec, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, Service des projets, Sols et matériaux, n°20-3171-8817, 9 p. et annexes.
RM0011	LVM Technisol (2007). <i>Rapport d'étude pédologique : Approches d'un pont - Route 199, Havre-aux-maisons / Îles-de-la-Madeleine</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, Rapport produit pour le ministère des Transports du Québec, n°PO11880-109, 10 p. et annexes.
RM0012	LVM Technisol (2008). <i>Rapport d'étude pédologique : Pont P-16859, Route 199 à Havre-aux-Maisons, Îles-de-la-Madeleine</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, Rapport produit pour le ministère des Transports du Québec, n°073-P011880-0108-GE-0001-02, 22 p. et annexes.
RM0013	LVM Technisol (2012). <i>Rapport d'expertise de chaussée : Remise à niveau de la route 199, Secteur Grande-Entrée</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, Rapport produit pour le ministère des Transports du Québec, n°154-92-0277, 9 p. et annexes.

RM0014	LVM Technisol (2012). <i>Rapport d'étude pédologique et de caractérisation environnementale : Route 199-01-130, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Grande-Entrée)</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, Rapport produit pour le ministère des Transports du Québec, n°154-92-0277, 21 p. et annexes.
RM0015	Sylvestre, M. (1974). <i>A finite element model for salt water upconing and its application to the Magdalen Islands aquifer</i> , Thesis (M.Sc.) in Earth Sciences, University of Waterloo (On), 112 p. et annexes.
RM0016	Madani, A. (2012). <i>Cartographie de l'élévation de l'interface eau douce - eau salée aux Îles-de-la-Madeleine par la méthode électromagnétique transitoire (TEM)</i> , Thèse (M.Sc.) en sciences appliquées (génie minéral) de l'École Polytechnique de Montréal (Qc), 108 p. et annexes.
RM0017	Comte, J.-C. (2009). <i>Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers : Application à trois contextes climatiques contrastés (Canada, Nouvelle-Calédonie, Sénégal)</i> , Thèse (Ph.D.) en sciences de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 186 p. et annexes.
RM0018	Mercier-Rémillard, A. (2011). <i>Stratigraphie, sédimentologie et micromorphologie du drift des demoiselles, Île du Havre-Aubert, Îles-de-la-Madeleine, Québec</i> , Mémoire (M.Sc.) en géographie à l'Université du Québec à Rimouski, 66 p. et annexes.
RM0019	Vigneault, B. (2012). <i>Cadre lithostratigraphique quaternaire du nord des Îles-de-la-Madeleine</i> , Mémoire (M.Sc.) en géographie à l'Université du Québec à Rimouski, 100 p. et annexes.
RM0020	Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. (2012). <i>Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine</i> , Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 71 p. et annexes.
RM0021	Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S. et Drejza, S. (2014). <i>Exposition potentielle des infrastructures à l'érosion côtière : Développement d'un outil de planification de l'aménagement côtier; Îles-de-la-Madeleine</i> , Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 50 p. et annexes.
RM0022	Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A. (2008). <i>Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du Golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques</i> , Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.
RM0023	Chevarie, H. (2005). <i>Les enjeux et l'organisation de la gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine: 1984-2004</i> , Rapport final comme exigence partielle du diplôme d'études supérieures spécialisées en administration publique régionale de l'Université du Québec à Rimouski, 41 p. et annexes.
RM0024	Hassaoui, J., Lemieux, J.-M., Molson, J. W. et Therrien, R. (2012). <i>Rapport d'état d'avancement des travaux de modélisation numérique des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine</i> , Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Rapport remis au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 68 p. et annexes.
RM0025	Ollivier, C., Hassaoui, J., Lemieux, J.-M., Molson, J. et Therrien, R. (2018). <i>Excursion hydrogéologique Îles-de-la-Madeleine (version modifiée préliminaire)</i> , Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval, 18 p.
RM0026	Gélinas, P. J. et Choquette, M. (1996). <i>Essais de caractérisation des grès rouge de Cap aux Meules</i> , Québec (Qc), Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval, Rapport produit pour SOPRIN/ADS, 26 p. et annexes.
RM0027	Hassaoui, J., Lemieux, J.-M., Molson, J. W., Therrien, R. et Therrien, P. (2014). <i>Impact des changements climatiques et des prélèvements d'eau sur les ressources en eau souterraine des îles</i>

	<i>de la Madeleine</i> , Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Rapport remis au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 137 p. et annexes.
RM0028	Leblanc, Y. (1994). <i>Analyse et modélisation numérique de huit puits de production sur l'Île du Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Québec (Qc), Essai de maîtrise (M.Sc.) à l'Université Laval, 112 p. et annexes.
RM0029	Lemieux, J.-M., Talbot-Poulin, M.-C., Dupuis, J. C. et Chouteau, M. (2016). <i>Caractérisation hydraulique des puits GE01 et EDN01 et présentation d'une corrélation préliminaire entre la conductivité hydraulique des roches et leur conductivité électrique</i> , Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Rapport remis au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 52 p. et annexes.
RM0030	Lemieux, J.-M., Dupuis, J. C., Chouteau, M. et Cochand, M. (2017). <i>Déploiement du réseau de suivi des eaux souterraines du Québec aux Îles de la Madeleine</i> , Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec (Qc), Rapport remis au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 72 p. et annexes.
RM0031	Groupe Madelin'Eau (2009). <i>Secteur de Grande-Entrée-Flanc Nord, Alimentation en eau potable : Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du Règlement sur le captage des eaux souterraines, Puits de production GE-09-01A; GE-09-02; GE-09-03; GE-09-04 et GE-09-05B</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°702, 61 p. et annexes.
RM0032	Tremblay, C. (2015). <i>Conception d'un essai à charge constante à l'aide d'obturateurs pneumatiques sur l'île de Grande-Entrée</i> , Québec (Qc), Projet de fin d'étude, Département de géologie et génie géologique, Université Laval, 24 p. et annexes.
RM0033	Ollivier, C. (2012). <i>Îles-de-la-Madeleine : Collecte des informations et création d'une base de données hydrogéologiques géoréférencée</i> , Québec (Qc), Rapport de stage, Département de géologie et génie géologique, Université Laval, 22 p. et annexes.
RM0034	Mercier, C.-É. et Tremblay C. (2014). <i>Rapport de fin de stage</i> , Québec (Qc), Département de géologie et génie géologique, Université Laval, 21 p.
RM0035	Technisol (1996). <i>Étude géotechnique : Conduite d'aqueduc et à l'interception et au traitement des eaux usées de la municipalité (Partie 1)</i> , Technisol, n°HA51724.500, 29 p. et annexes.
RM0036	SNC-Lavalin (1993). <i>Centre d'incinération et de compostage des déchets, Îles-de-la-Madeleine : Demande de certificat d'autorisation pour l'implantation d'un centre de tri/compostage/incinération aux Îles-de-la-Madeleine</i> , Montréal (Qc), SNC-Lavalin environnement inc., n°projet 4096, 12 p. et annexes.
RM0037	SGC Environnement (2008). <i>Évaluation environnementale de site, Emprise des futures infrastructures d'aqueduc : Segment de la route 199, Chemin-Du-Bassin-Ouest et Allée-de-Ceinture à Grande-Entrée (IDM)</i> , SGC Environnement, n°IDM-08081, 14 p. et annexes.
RM0038	Roche ltée (2012). <i>Alimentation en eau potable du secteur de Grande-Entrée - Phase 1, Tome I et II</i> , Québec (Qc), Roche ltée Groupe-Conseil, n°032387.002-002, 1072 p.
RM0039	Roche ltée (2009). <i>Projet d'alimentation en eau potable : Évaluation de la conformité des installations d'eau potable et d'eau usées</i> , Québec (Qc), Roche ltée Groupe-Conseil, n°32387-014, 26 p. et annexes.
RM0040	Roche ltée (2009). <i>Mise aux normes des installations de production d'eau potable du secteur de l'île de Grande-Entrée</i> , Québec (Qc), Roche ltée Groupe-Conseil, n°32387-005, 34 p. et annexes.
RM0041	Roche Associés ltée (1976). <i>Projet d'aqueduc : Étude complémentaire</i> , Roche Associés ltée Groupe-Conseil, n°projet 2-192-02, 5 p.

RM0042	Roche Associés ltée (1978). <i>Étude d'alimentation en eau potable</i> , Roche Associés ltée Groupe-Conseil, n°projet 2-193-10, 13 p.
RM0043	Ouranos (2008). <i>Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques : Synthèse des résultats</i> , Ouranos, 48 p.
RM0044	Lemieux, G. (1977). <i>Les Îles-de-la-Madeleine (Écologie et développement)</i> , Québec (Qc), Office de planification et de développement du Québec, 31 p.
RM0045	MAM (2000). <i>Programme d'assainissement des eaux du Québec : Cahier des exigences environnementales, La municipalité Havre-aux-Maisons</i> , Ministère des Affaires municipales, Gouvernement du Québec, 18 p. et annexes.
RM0046	LVM Technisol (2008). <i>Rapport d'étude pédologique (Rapport révisé) : Réfection de la route 199 Cap-aux-Meules / Fatima, Îles de la Madeleine</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, n°073-P016029-0100-GE-001-01, 106 p.
RM0047	LVM Technisol (2013). <i>Raccordement de puits d'eau potable au réseau de l'île du Havre-aux-Maisons</i> , Rimouski (Qc), LVM Technisol, n° 073-P0003481-0-01-100-GE-R-0100-00, 70 p.
RM0048	Roche ltée (2014). <i>Rapport technique : Construction d'un puits d'eau salée (P-1-13) Usine Cap-sur-Mer, Grande-Entrée, I.M.</i> , Roche ltée Groupe-Conseil, n°13250-101, 21 p. et annexes.
RM0049	Consultants H.G.E. inc. (1987). <i>Étude hydrogéologique Îles-de-la-Madeleine, Municipalité du Havre-aux-Maisons</i> , Les Consultants H.G.E. inc., n°projet HGE-87-252-1, 17 p. et annexes.
RM0050	GTS-STE inc. (1974). <i>Étude d'alimentation en eau salée : Parc industriel de pêche, Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Dorval (Qc), GTS-STE inc., 15 p. et annexes.
RM0051	GTS-STE inc. (1976). <i>Rapport préliminaire de l'alimentation en eau du parc industriel de Cap-aux-Meules</i> , Dorval (Qc), GTS-STE inc., 14 p. et annexes.
RM0052	ADS associés ltée (1990). <i>Modélisation mathématique des eaux souterraines de Cap-aux-Meules. Rapport d'étape N°1</i> , Montréal (Qc), ADS associés ltée, n°projet 17-36-261-001, 18 p. et annexes.
RM0053	ADS associés ltée (1990). <i>Effet du pompage de l'Hydro-Québec sur le comportement de la nappe alimentant en eau potable la municipalité de Cap-aux-Meules</i> , Montréal (Qc), ADS associés ltée, Rapport produit pour Hydro-Québec, n°projet 17-36-255-005, 4 p. et figures.
RM0054	ADS associés ltée (1989). <i>Étude hydrogéologique : Aménagement d'un puits d'alimentation, Île d'Entrée</i> , Montréal (Qc), ADS associés ltée, Rapport produit pour Hydro-Québec, 15 p. et annexes.
RM0055	ADS associés ltée (1990). <i>Mesures transitoires pour l'alimentation en eau potable de la municipalité de Cap-aux-Meules : Essais de pompage des puits alternatifs Canapro n°2 et MacCormack n°2</i> , Montréal (Qc), ADS associés ltée, Rapport produit pour Hydro-Québec, 27 p. et annexes.
RM0056	Chaillou, G., Touchette, M., Rémillard, A.M., Buffin-Bélanger, T., St-Louis, R., Héту, B. et Tita, G. (2012). <i>Synthèse de l'état des connaissances sur les eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine : Impact de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles sur les eaux souterraines</i> , Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski, Synthèse remise au ministère des Ressources naturelles (MRN). 200 p.
RM0057	BAPE (2013). <i>Les effets liés à l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles sur les nappes phréatiques aux Îles-de-la-Madeleine, notamment ceux liés à l'exploration et exploitation gazière</i> , Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, Rapport 297, 157 p. et annexes.
RM0058	Bilodeau, D. (1995). <i>Définition de débits sécuritaires au droit des puits de production P1 et P2. Municipalité de Havre-Aubert, Îles-de-la-Madeleine</i> , Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc., Rapport produit pour Les Consultants BPR, 13 p. et annexes.
RM0059	BPR Groupe-Conseil (2004). <i>Plan de gestion : Sources d'emprunt pour l'approvisionnement en matériaux granulaires, Îles-de-la-Madeleine</i> , BPR Groupe-Conseil, Rapport produit pour la

	Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et le ministère des Transports du Québec, n°M69-02-59, 81 p. et annexes.
RM0060	Bilodeau, D. (1993). <i>Construction et essais de huit puits de production d'eau potable sur l'Île Centrale, Îles-de-la-Madeleine</i> , Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc., Rapport produit pour Les Consultants BPR, 20 p. et annexes.
RM0061	Bilodeau, D. (1998). <i>Municipalité de l'île-du-Havre-Aubert : Étude hydrogéologique</i> , Brossard (Qc), Donat Bilodeau Experts-Conseil inc., Rapport produit pour Les Consultants BPR, 30 p. et annexes.
RM0062	BPR-Infrastructure inc. (2011). <i>Municipalité des Îles-de-la-Madeleine : Révision du plan directeur de gestion de l'eau potable</i> , Charny (Qc), BPR-Infrastructure inc., n°Q571-08-02, 47 p. et annexes.
RM0063	Gagnon, M. (1998). <i>Regional Assessment Magdalen Islands : Priority Intervention Zone 21</i> , Environment Canada - Quebec Region, Environmental Conservation, 66 p. et annexes.
RM0064	Martin, M. (1996). <i>L'évaluation de politiques de gestion des eaux souterraines des Îles-de-la-Madeleine: Application de l'approche contingente et de la méthode des coûts évités</i> , Québec (Qc), Examen doctoral à l'École nationale d'administration publique (ENAP), 33 p. et annexes.
RM0065	Groupe Madelin'Eau (2003). <i>Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine, Un défi de développement durable</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 69 p. et annexes.
RM0066	Chouteau, M. et Intissar, R. (2010). <i>Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase I)</i> , Montréal (Qc), École Polytechnique de Montréal, 68 p. et annexes.
RM0067	Chouteau, M., Bouchedda, A. et Madani, A. (2011). <i>Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase II)</i> , Montréal (Qc), École Polytechnique de Montréal, 96 p. et annexes.
RM0068	Chouteau, M. et Bouchedda, A. (2014). <i>Développement d'une méthodologie de suivi de l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines pour les Îles-de-la-Madeleine (Phase III)</i> , Montréal (Qc), École Polytechnique de Montréal, 72 p. et annexes.
RM0069	Geoterrex LDT (1976). <i>Étude hydrogéologique complémentaire par sondages électriques des Îles-de-la-Madeleine</i> , Ottawa (On), Geoterrex ldt, Rapport produit pour le ministère des Richesses naturelles du gouvernement du Québec, n°85-724, 37 p. et annexes.
RM0070	Geoterrex LDT (1971). <i>Étude hydrogéologique par sondages électriques des Îles-de-la-Madeleine</i> , Ottawa (On), Geoterrex ldt, Rapport produit pour le ministère des Richesses naturelles du gouvernement du Québec, n°85-724, 39 p. et annexes.
RM0071	Géophysique GPR (1990). <i>Étude géophysique sur les sites des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'île d'Entrée, Volet A : Centrale de Cap-aux-Meules</i> , Longueuil (Qc), Géophysique GPR international inc., Rapport produit pour Hydro-Québec, n°projet M90084, 22 p. et annexes.
RM0072	Géophysique GPR (1990). <i>Étude géophysique sur les sites des centrales thermiques de Cap-aux-Meules et de l'île d'Entrée, Volet B : Centrale de l'île d'Entrée</i> , Longueuil (Qc), Géophysique GPR international inc., Rapport produit pour Hydro-Québec, n°projet M90084, 24 p. et annexes.
RM0073	Lalonde, Girouard, Letendre et associés ltée. (1986). <i>Étude d'approvisionnement en eau salée du parc industriel de pêche de Cap-aux-Meules (version préliminaire)</i> , Montréal (Qc), Lalonde, Girouard, Letendre et associés ltée, Rapport produit pour le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 34 p. et annexes.
RM0074	Lalonde, Girouard, Letendre et associés ltée. (1988). <i>Essai de pompage de très longue durée au puits d'essai n° 1 dans le parc industriel de pêche de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Montréal (Qc), Lalonde, Girouard, Letendre et associés ltée, Rapport produit pour le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 18 p. et annexes.

RM0075	LEQ (1993). <i>Construction de deux puits permanents : Recherche en eau souterraine</i> , Québec (Qc), Laboratoire d'expertises de Québec ltée, Rapport produit pour Les Consultants Lapel inc, n°2066-00-01, 17 p. et annexes.
RM0076	Inspec-sol (2009). <i>Étude géotechnique : Réaménagement de la route 199 et installation d'une conduite d'aqueduc, Secteur Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine (Québec)</i> , Inspec-sol ingénierie et solutions, n°Q021424-A1, 10 p. et annexes.
RM0077	International Water Supply Ltd (1974). <i>Rapport sur l'exécution d'un programme de développement des nappes d'eau souterraine à Étang-du-Nord, Fatima, Lavernière</i> , International Water Supply Ltd, 13 p. et annexes.
RM0078	Compagnie internationale des eaux ltée (1975). <i>Rapport sur l'expertise de forage et de pompage aux Îles-de-la-Madeleine pour les municipalités de Fatima et de l'Étang-du-Nord</i> , International Water Supply Ltd, n°1-1-01-1338-40, 4 p. et annexes.
RM0079	Bureau, M. (1995). <i>Localisation des interfaces eau douce - eau saumâtre - eau salée par méthodes géophysiques aux puits de captage Vigneau de Havre-Aubert</i> , Rapport produit pour la municipalité de Havre-Aubert, 6 p. et annexes.
RM0080	Langford, L. et Gagnon, J. (1984). <i>L'eau potable aux Iles-de-la-Madeleine : Rapport sur la gestion de la ressource</i> , Municipalité régionale de comté, 59 p. et annexes.
RM0081	BPR inc. (2006). <i>Bilan 2005 de l'utilisation d'eau dans les cinq (5) villages</i> , BPR inc., Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°M69-99-39 (60ET), 45 p. et annexes.
RM0082	Gagnon, J. (1986). <i>Situation de l'approvisionnement en eau potable aux Îles-de-la-Madeleine</i> , Comité MENVIQ/MAM/MRC, 20 p. et document de travail.
RM0083	LP associés ltée (1981). <i>Ile du Havre-Aubert : Expertise sur l'alimentation en eau</i> , Lajoie, Pellerin et associés ltée, Rapport produit pour le Comté des Îles-de-la-Madeleine, 8 p. et annexes.
RM0084	LP associés ltée (1984). <i>Étude préliminaire, Addition de puits pour approvisionnement en eau potable</i> , Lajoie, Pellerin et associés ltée, Rapport produit pour les corporations municipales de l'Étang-du-Nord et Fatima, n°84-326-00, 20 p. et annexes.
RM0085	Groupe Madelin'Eau (2004). <i>Gestion des eaux souterraines aux Îles-de-la-Madeleine, Un défi de développement durable, Rapport final : Document No 1 Méthodologie de l'étude, Document No 2 Île de Cap-aux-Meules, Document No 3 Secteurs hors île de Cap-aux-Meules</i> , Groupe Madelin'Eau. Version révisée et complétée, 327 p.
RM0086	Groupe Madelin'Eau (2004). <i>Évaluation de la capacité support des ressources en eau souterraine pour fins d'alimentation en eau potable</i> , Groupe Madelin'Eau, Version révisée le 15 mars 2005, 50 p.
RM0087	Groupe Madelin'Eau (2005). <i>Étude de faisabilité : Utilisation de la géothermie dans les édifices municipaux</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 38 p. et annexes.
RM0088	Groupe Madelin'Eau (2007). <i>Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines (Q2, R.1.3). Forages FE-06-03, FE-06-04, FE-06-05 et FE-06-06, Secteur sud-est de l'île de Grande-Entrée</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°624, 47 p. et annexes.
RM0089	Groupe Madelin'Eau (2008). <i>Captages municipaux-P1, P2, P3 et P4, Prélèvement additionnel de 400 m<sup>3</sup>/jour aux débits autorisés, Examen de la faisabilité</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°687, 23 p. et annexes.
RM0090	Groupe Madelin'Eau (2009). <i>Secteurs couverts par un réseau d'aqueduc, Réponses aux questions posées par BPR-Groupe Conseil dans le cadre de la mise aux normes des réseaux</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°700, 24 p. et annexes.

RM0091	Groupe Madelin'Eau (2010). <i>Secteur de l'Étang-du-Nord (Regroupement N°1), Alimentation en eau potable, Puits EDN-09-01PP; EDN-09-02PP; EDN-09-03PP et EDN09-04PP. Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES. Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n° projet 2009-711, 61 p. et annexes.
RM0092	Groupe Madelin'Eau (2010). <i>Secteur de Fatima (Regroupement N°2), Alimentation en eau potable, Puits FAT-09-01PP; FAT-09-02PP; FAT-09-03PP et FAT-09-04PP, Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES, Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n° projet 2009-711, 68 p. et annexes.
RM0093	Groupe Madelin'Eau (2010). <i>Secteur de Havre-aux-Maisons (Regroupement N°3), Alimentation en eau potable, Puits HAM-09-01PP et HAM-09-02PP, Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du RCES, Phase III-Rapport d'expertise hydrogéologique</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n° projet 2009-711, 60 p. et annexes.
RM0094	Groupe Madelin'Eau (2011). <i>Projet de réalisation d'un forage gazier vertical et conventionnel d'une profondeur de 2500 mètres, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Reconnaissance/Identification des cibles les plus propices, Rapport d'étape 1</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°projet 2011-767, 54 p. et annexes.
RM0095	Groupe Madelin'Eau (2012). <i>Alimentation en eau potable. Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines. Secteurs d'Étang-du-Nord, Fatima et de Havre-aux Maisons. Note technique 01</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n° projet 2009-711, 27 p. et annexes.
RM0096	Groupe Madelin'Eau (2012). <i>Archipel des Îles-de-la-Madeleine. Suivi piézométrique des nappes aquifères. Note technique. Étape 1-Reconnaissance de terrain</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, n°projet 2012-784, 9 p. et annexes.
RM0097	Groupe Madelin'Eau (2003). <i>Rapport hydrogéologique, Ile Centrale, Secteur du Cap-aux-Meules</i> , Groupe Madelin'Eau, Rapport produit pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 52 p. et annexes.
RM0098	Sylvestre, M. et Boucher, J.-M. (1985). <i>Eau potable aux Îles-de-la-Madeleine (Problématique-Situation et Propositions)</i> , 16 p. et annexes.
RM0099	MRN (1965). <i>Levé hydrogéologique à Havre-Aubert, Comté des îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, n°658, 5 p. et figure.
RM0100	MRN (1966). <i>Aperçu des travaux sur les recherches en eau souterraine aux îles-de-la-Madeleine, Comté des îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, n°658-A, 5 p. et figure
RM0101	MRN (1967). <i>Conférence internationale de l'eau pour la paix : Ressources en eau potable et problèmes d'alimentations aux Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 11 p.
RM0102	Brisebois, D. (1972). <i>Géologie de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine (Rapport préliminaire)</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, n°DP-103, 7 p.
RM0103	Poulin, M. (1977). <i>Étude hydrogéologique des îles de Grosse-Île et de Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine</i> , Dorval (Qc), Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 53 p. et annexes.
RM0104	Sylvestre, M. (1979). <i>Carte hydrogéologique des Îles-de-la-Madeleine (Rapport préliminaire)</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 22 p. et figures.
RM0105	Sylvestre, M. (1979). <i>Étude d'alimentation en eau souterraine à Havre-aux-Maisons, Comté des Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 4 p.

RM0106	Sylvestre, M. (1979). <i>Étude par modèle mathématique des nappes souterraines de la Grosse Île et de l'Île de la Grande Entrée, Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 69 p. et annexes.
RM0107	Brisebois, D. (1981). <i>Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères de l'archipel des îles de la Madeleine</i> , Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec, n°DPV-796, 46 p. et annexes.
RM0108	Rabeau, O et Thériault, R. (2013). <i>Modélisation géologique 3D des Îles-de-la-Madeleine</i> , Bureau de l'exploration géologique du Québec (BEGQ) et Ministère des Ressources naturelles (MRN), Gouvernement du Québec, n°GM66895, 6 p.
RM0109	Dessureault, R et Simard, G. (1970). <i>Hydrogéologie des Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère des Richesses naturelles, Gouvernement du Québec, 46 p. et annexes.
RM0110	Tardif, L. (1967). <i>Pédologie des Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Gouvernement du Québec, 46 p. et annexes.
RM0111	Génilab BSLG inc. (1987). <i>Recherche en eau salée, Cap-aux-Meules : Essais de pompage de courte et longue durées et analyses de laboratoire</i> , Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Gouvernement du Québec, n°87576, 8 p. et annexes.
RM0112	SNC inc. (1989). <i>Étude hydrogéologique, Centrale thermique des Îles-de-la-Madeleine (version préliminaire)</i> , SNC inc., Rapport produit pour Hydro-Québec, n°3650-4300, 19 p. et annexes.
RM0113	Sylvestre, M. (1981). <i>Approvisionnement en eau salée, Parc Industriel de pêche, Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec, n°E.S.1077, 4 p. et annexes.
RM0114	MENV (1993). <i>Directive du ministre indiquant la nature, la portée et l'étendue de l'étude d'impact sur l'environnement : Projet d'établissement d'un dépôt de matériaux secs par la compagnie SNC-Lavalin dans la municipalité Havre-aux-Maisons</i> , Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec, n°3211-24-004, 11 p.
RM0115	Prest, V.K., Terasme, J., Matthews, J.V. et Lichti-Federovich, S. (1976). <i>Late-Quaternary history of Magdalen Islands, Quebec</i> , Maritime Sediments, vol. 12, no. 2, p.39-59.
RM0116	Technisol (1992). <i>Étude hydrogéologique, Futur site d'enfouissement sanitaire</i> , Technisol inc., n°42190, 15 p. et annexes.
RM0117	Technisol (1991). <i>Usine de compostage, Havre-aux-Maisons, Étude géotechnique</i> , Technisol inc., n°41205, 12 p. et annexes.
RM0118	ASA (2006). <i>Étude géotechnique et hydrogéologique, Les Îles-de-la-Madeleine</i> , Québec (Qc), André Simard et associés, n°projet 06-2238, 7 p. et annexes.
RM0119	BPR inc. (2005). <i>Ouverture et exploitation de la sablière de Havre-aux-Maisons, Étude des répercussions environnementales</i> , BPR inc., n°M69-02-53 (110CAU), 7 p. et figures.
RM0120	Technisol (2001). <i>Projet d'établissement d'un lieu d'enfouissement technique aux Îles-de-la-Madeleine, Centre de traitement des ordures, Havre-aux-Maisons</i> , Rimouski (Qc), Technisol inc., n°MR00233.521, 17 p. et annexes.
RM0121	Dessau (2012). <i>Travaux d'obturation des puits d'observation et de la récupération et démantèlement des conduites d'air, d'eau et d'huile. Centrale thermique, Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Québec, Québec (Qc), Dessau, n°045-0000922-0-01-001-HG-R-0200-0B, 7 p. et annexes.
RM0122	AGEOS (2005). <i>Demande d'autorisation en vertu de l'article 31 du règlement sur le captage des eaux souterraines, forages P-3 (IGLOO), PZ-1/05 et PZ-2/05, Rapport hydrogéologique</i> , AGEOS Eau-Environnement, 45 p. et annexes.

RM0123	EnviroConseil (1998). <i>Caractérisation de l'eau souterraine et évaluation du potentiel de bioatténuation à l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules (Automne 1997)</i> , Québec (Qc), EnviroConseil, Rapport produit pour Hydro-Québec, n°1(0298), 73 p. et annexes.
RM0124	Soprin-ADS (1997). <i>Modélisation numérique des hydrocarbures sur la nappe d'eau souterraine à l'ancienne centrale thermique de Cap-aux-Meules, Révision, Mise à jour du modèle et simulation des scénarios d'optimisation du système de récupération</i> , Québec (Qc), Soprin-ADS, Rapport produit pour Hydro-Québec, n°1550-019-301, 98 p.
RM0125	International Water Supply Ltd (1969). <i>Rapport approvisionnement en eau - Ministère des Travaux publics - Havre-Aubert</i> , Montréal, Qc, 6 p. et annexes.
RM0126	Compagnie internationale des eaux ltée (1983). <i>Puits de Cap-aux-Meules</i> , Montréal, Qc, 2 p.
RM0127	MRN (1974). <i>Rapports d'essai de pompage, puits 73-1</i> , 10 p.
RM0128	MDDEFP (2012). <i>Campagne de forage MDDEFP - Automne 2012, Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 16 p.
RM0129	MELCC (1980). <i>Niveaux piézométriques de puits à Fatima</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 6 p.
RM0130	MELCC (1985). <i>Niveaux piézométriques de puits à Grande-Entrée</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 23 p.
RM0131	MELCC (1995). <i>Niveaux piézométriques au puits Vigneau</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 14 p.
RM0132	MRN (1972). <i>Niveaux piézométriques au puits Havre-aux-Maisons no.2</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 8 p.
RM0133	MRN (-). <i>Essai de pompage au puits 74-1</i> , Ministère des Ressources naturelles, 23 p.
RM0134	MELCC (1982). <i>Dossier des stations piézométriques, Identification de la station et des piézomètres</i> , Ministère de l'Environnement, Service des eaux souterraines, 10 p.
RM0135	Sylvestre, M. (1984). <i>Note de service - Déplacement du front d'eau salée sous les puits de pompage de Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine</i> , Ministère de l'Environnement du Québec, 3 p.
RM0136	MRN (1972). <i>Niveaux piézométrique et description du puits Vigneau</i> , Ministère des Ressources naturelles, 5 p.
RM0137	Matte, D. (1971). <i>Réseau d'aqueduc de Havre-aux-Maisons, Îles-de-la-Madeleine, Essai de pompage</i> , Ministère des Transports du Québec, 5 p.
RM0138	MELCC (1999). <i>Puits abandonnés</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 14 p.
RM0139	MELCC (1999). <i>Puits abandonnés Havre-aux-Maisons</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 5 p.
RM0140	MELCC (1999). <i>Puits abandonnés et niveaux piézométriques Havre-Aubert</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 11 p.
RM0141	Tessier, Y. (1982). <i>Recherche en eau Havre-Aubert - Essai de pompage</i> , Québec, Qc, Geo-Spec, n°8201-02-I, 22 p.
RM0142	MELCC (1988). <i>Niveaux piézométriques de la station 13007031</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 5 p.

RM0143	MELCC (1992). <i>Niveaux piézométriques des stations 13007041 et 13007042</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 6 p.
RM0144	MELCC (1988). <i>Niveaux piézométriques de la station 13007001</i> , Ministères de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 7 p.
RM0145	Arrakis (2019). <i>Diagnostics de puits</i> , Québec, Qc, Arrakis consultants inc., Rapport produit pour la municipalité Les Îles-de-la-Madeleine, n°A0807-01A, 22 p. et annexes.
RM0146	Biogénie inc. (1993). <i>Étude de caractérisation de l'aire d'entraînement des pompiers et de ses environs à l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine sur le chemin de l'aéroport</i> , Québec (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°409, 17 p. et annexes.
RM0147	Roche (1999). <i>Étude hydrogéologique - aéroport des Îles-de-la-Madeleine</i> , Rapport final, Québec (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°20854-000, 47 p. et annexes.
RM0148	TechnoRem (2005). <i>Modélisation et suivi de la qualité des eaux souterraines - aéroport des Îles-de-la-Madeleine</i> , Laval (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°PR04-69, 87 p. et annexes.
RM0149	Entraco inc. (2008). <i>Évaluation environnementale du site Phase 2, Caractérisation des sols et de l'eau souterraine</i> , Montréal (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°P0857, 66 p. et annexes.
RM0150	Entraco inc. (2014). <i>Évaluation environnementale de site Phase II</i> , Greenfield (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°P0962, 39 p. et annexes.
RM0151	Biogénie inc. (2015). <i>Évaluation environnementale de site Phase II - Ancien dépôt pétrolier Esso n°44-0203/88000389</i> , Rapport produit pour Transports Canada, n°ES4240, 28 p. et annexes.
RM0152	Stantec (2018). <i>Caractérisation environnementale de site Aéroport des Îles-de-la-Madeleine, Havre-aux-Maisons Québec</i> , St-Laurent (Qc), Rapport produit pour Transports Canada, n°167011905, 46 p. et annexes.
RM0153	MENV (1994). <i>Autorisation de huit nouveaux puits, L'Île-du-Cap-aux-Meules</i> , Ministère de l'Environnement, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles de la Madeleine, Rimouski (Qc), n°7321-11-01-0387400, 3 p.
RM0154	MENV (1994). <i>Aménagement et raccordement de deux nouveaux puits et modifications aux deux puits existants, Corporation de Havre-aux-Maisons</i> , Ministère de l'Environnement, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles de la Madeleine, Rimouski (Qc), n°7321-11-01-0145004, 2 p.
RM0155	MENV (1995). <i>Intégration du réseau d'aqueduc - Lot n° 5</i> , Ministère de l'Environnement, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles de la Madeleine, Rimouski (Qc), n°7321-11-01-0387401, 2 p.
RM0156	MENV (1997). <i>Construction d'un puits et modification des deux puits existants</i> , Ministère de l'Environnement, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles de la Madeleine, Sainte-Anne-des-Monts (Qc), n°7311-11-01-0118009, 2 p.
RM0157	MDDEP (2011). <i>Aménagement de neufs puits municipaux d'eau souterraine</i> , Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Québec (Qc), n°7311-11-01-0150002, 8 p.
RM0158	MDDEFP (2013). <i>Aménagement et exploitation de quatre puits de captage d'eau souterraine dans le secteur de l'Étang-du-Nord</i> , Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Québec (Qc), n°7311-11-01-0170011, 6 p.
RM0159	MDDEFP (2013). <i>Aménagement et exploitation de quatre puits de captage d'eau souterraine dans le secteur de Fatima</i> , Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Québec (Qc), n°7311-11-01-0170012, 6 p.

RM0160	MDDEFP (2013). <i>Aménagement et exploitation de deux puits de captage d'eau souterraine dans le secteur de Havre-aux-Maisons</i> , Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Québec (Qc), n°7311-11-01-0170013, 5 p.
RM0161	INRS-ETE (2020). <i>Développement d'une méthodologie de caractérisation des aquifères côtiers applicables aux îles de la Madeleine</i> , Institut national de recherche scientifique, Québec (Qc), Rapport produit pour le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 25 p. et annexes.
RM0162	Arrakis (2021). <i>Diagnostics de puits</i> , Québec (Qc), Annakis consultants inc., Rapport produit pour la municipalité Les Îles-de-la-Madeleine, n°A0807-02A, 40 p. et annexes.
RM0163	SOQUEM (1975). <i>Programmes de sondages et étude du sol, îles de la Madeleine</i> , SOQUEM, Montréal, 6 p. et annexes.
RM0164	Bouchard, M. (2002). <i>Communication - Suivi de la rencontre du 4 octobre 2002</i> , Hydro-Québec, Cap-aux-Meules, Québec (Qc), 2 p.

**Annexe 8 : Schémas d'aménagement et descriptions stratigraphiques détaillées pour les puits du RSESQ**

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 1300001 (F-1)

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.506371  
 LATITUDE: 47.566355  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 26.028

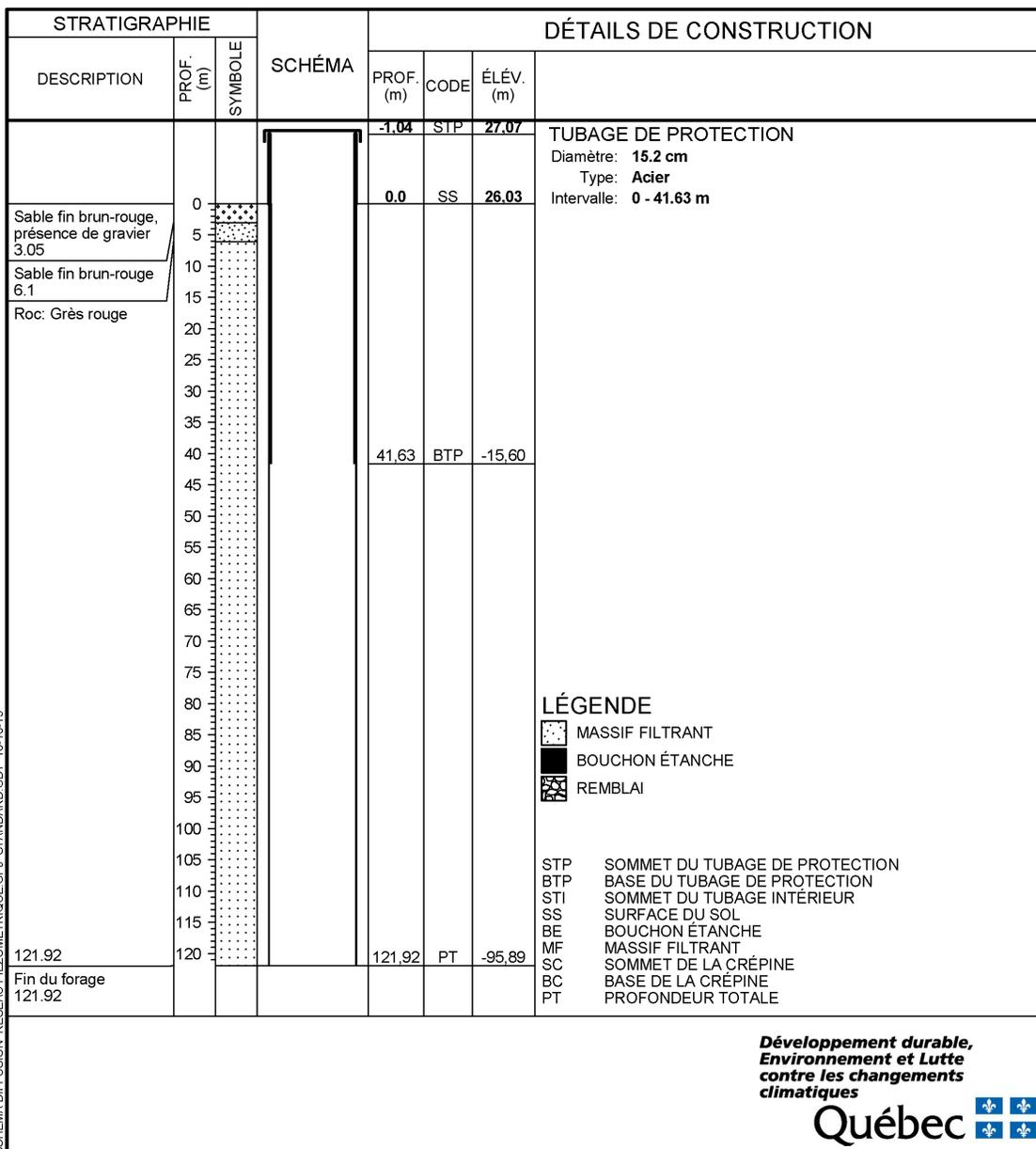


Figure A.57 : Schéma d'aménagement du piézomètre 1300001 (F-1), île de la Grande Entrée

**Tableau A.29 : Description de la séquence stratigraphique du puits d'observation F-1 de l'île de la Grande Entrée**

<b>Profondeur (m)</b>	<b>Description lors du forage</b>	<b>Description des échantillons</b>
0 – 3,1	Sable fin brun-rouge, présence de gravier	Sable moyen à fin, rougeâtre, sans effervescence au HCL 10 %
3,1 – 6,1	Sable fin brun-rouge	
6,1 – 36,6	Roc : Grès rouge	Pas d'échantillon
36,6 – 48,8		Grès rouge
48,8 – 121,9		Pas d'échantillon

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 1300002 (F-2)

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.505122  
 LATITUDE: 47.565302  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 14.817

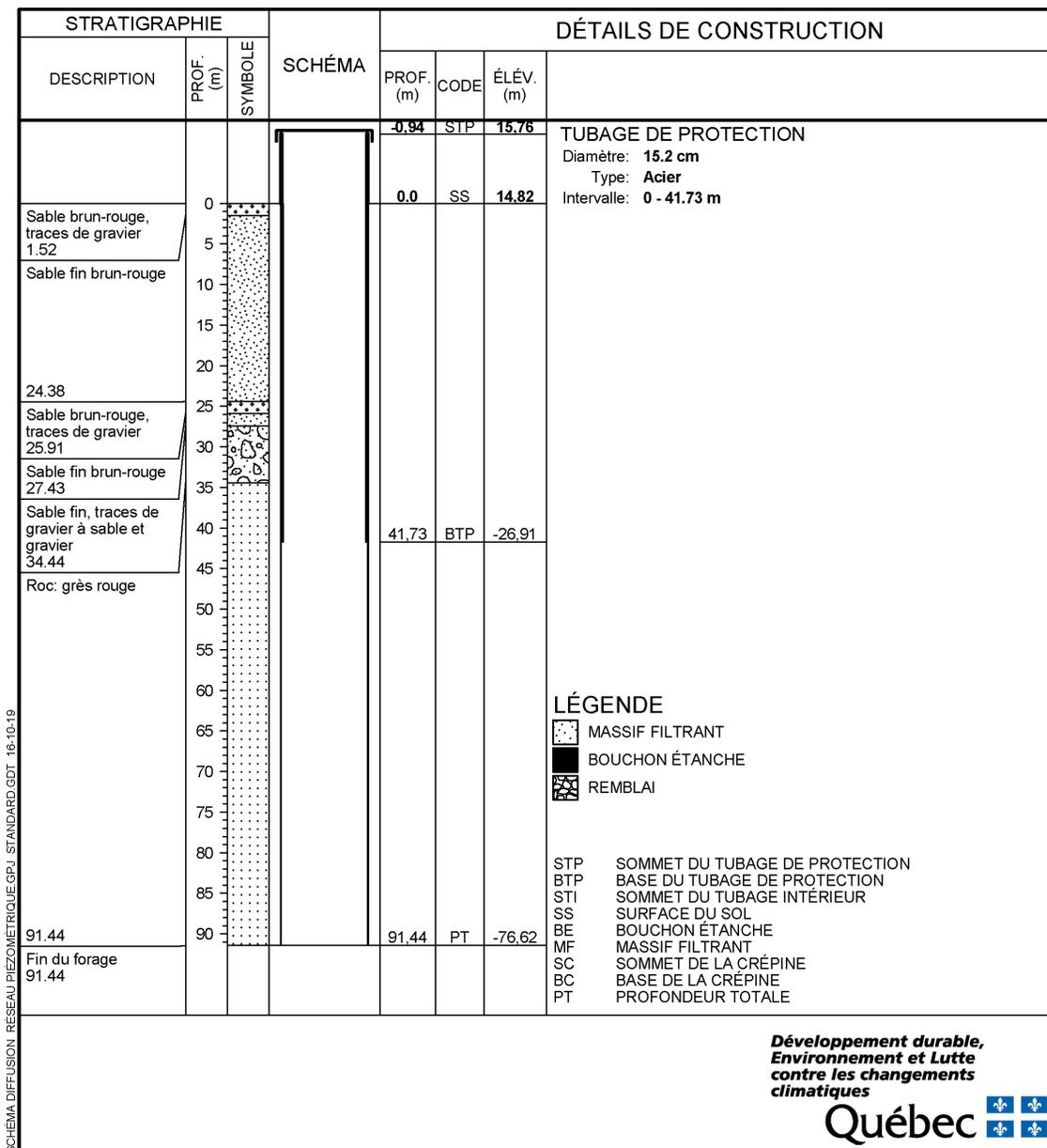


Figure A.58 : Schéma d'aménagement du piézomètre 1300002 (F-2), île de la Grande Entrée

**Tableau A.30 : Description de la séquence stratigraphique du puits d'observation F-2 de l'île de la Grande Entrée**

Profondeur (m)	Description lors du forage	Description des échantillons	
0 – 1,5	Sable brun-rouge, traces de gravier	Sable moyen à fin, rougeâtre, avec quelques cailloux et gravillons sub-anguleux à sub-arrondis	
1,5 – 13,7	Sable fin brun-rouge		
13,7 – 16,8			Sable moyen, rougeâtre, bien trié
16,8 – 18,3			Sable moyen, beige, bien trié
18,3 – 19,8			Pas d'échantillon
19,8 – 24,4			Sable moyen, beige, bien trié
24,4 – 25,9	Sable brun-rouge, traces de gravier		
25,9 – 27,4	Sable fin brun-rouge	Sable moyen à grossier, beige, avec quelques granules, légère effervescence au HCL 10 %	
27,4 – 29,0	Sable fin, traces de gravier à sable et gravier	Sable grossier, beige, avec quelques graviers; sable grossier avec quelques gravillons calcaires et gris, effervescence au HCL 10 %	
29,0 – 30,5		Sable moyen, beige, avec graviers au diamètre maximal de 1 à 3 cm, matrice effervescente au HCL 10 %	
30,5 – 32,0		Sable moyen à grossier, beige, avec graviers au diamètre maximal de 1 cm, avec cailloux calcaires sub-anguleux à sub-arrondis, matrice effervescente au HCL 10 %	
32,0 – 33,5		Sable graveleux, beige, avec cailloux calcaires au diamètre maximal de 1 à 3 cm	
33,5 – 34,4		Pas d'échantillon	
34,4 – 35,1		Roc : grès rouge	Grès rouge
35,1 – 41,1	Pas d'échantillon		
41,1 – 73,2	Grès rouge		
73,2 – 79,2	Pas d'échantillon		
79,2 – 91,4	Pas d'échantillon		

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 1300003 (F-3)

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.50385  
 LATITUDE: 47.56403  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 7.496

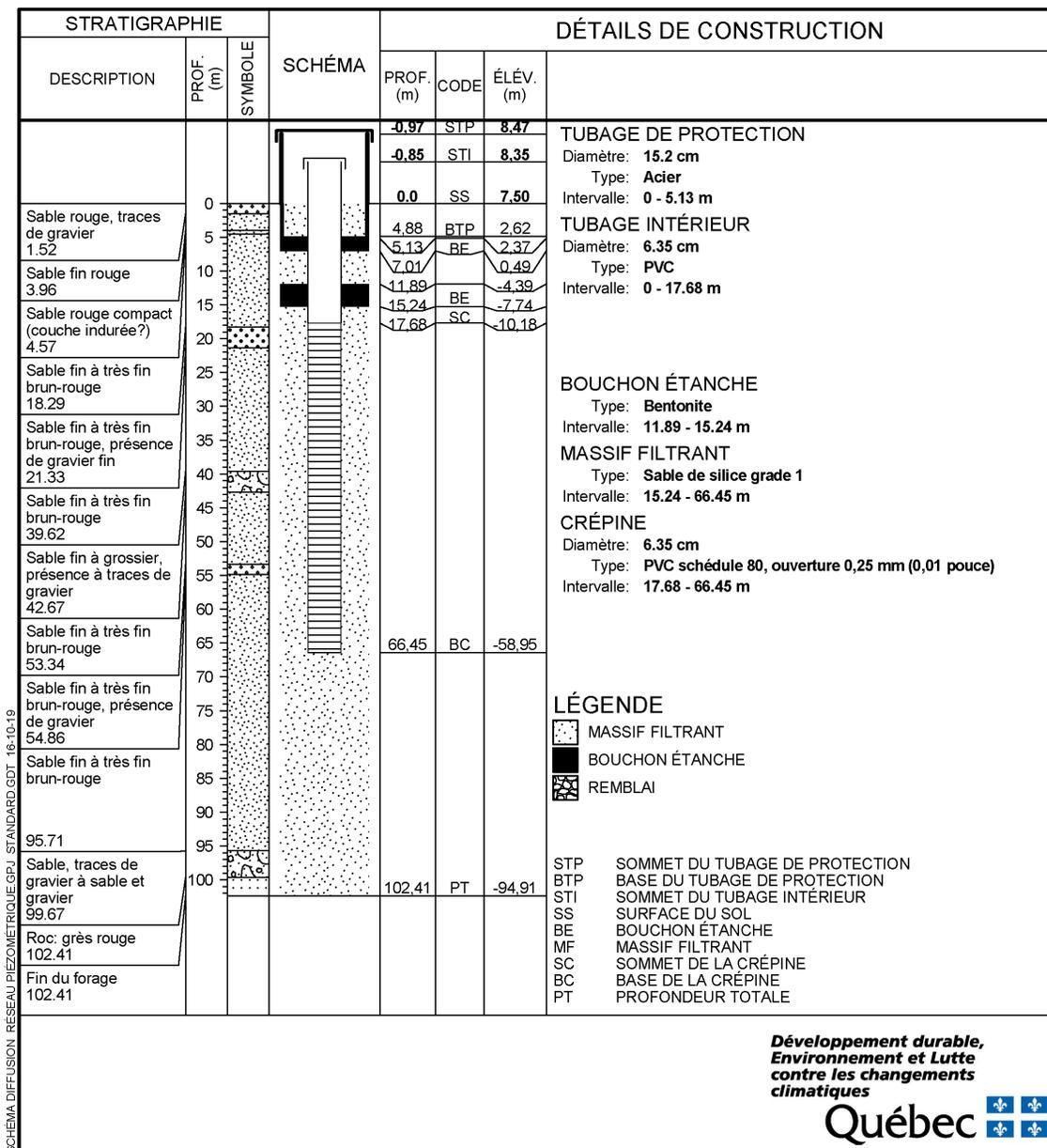


Figure A.59 : Schéma d'aménagement du piézomètre 1300003 (F-3), île de la Grande Entrée

**Tableau A.31 : Description de la séquence stratigraphique du puits d'observation F-3 de l'île de la Grande Entrée**

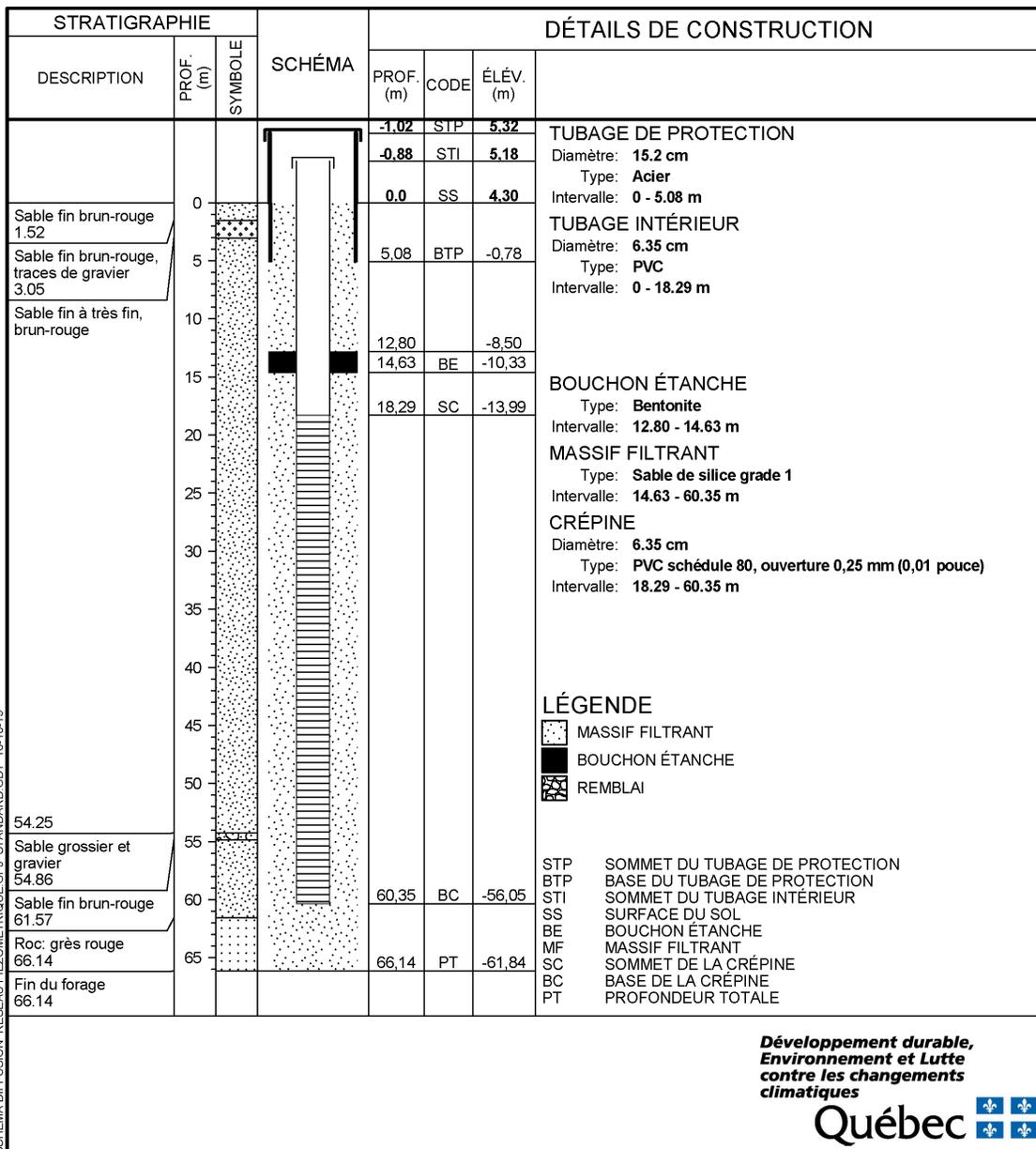
Profondeur (m)	Description lors du forage	Description des échantillons	
0 – 1,5	Sable rouge, traces de gravier	Pas d'échantillon	
1,5 – 3,0	Sable fin à très fin brun rouge	Sable moyen à fin, rougeâtre	
3,0 – 4,0		Sable moyen à fin, rougeâtre, légèrement silteux, avec des niveaux silteux	
4,0 – 4,6		Sable moyen à fin, rougeâtre, légèrement silteux	
4,6 – 15,2		Sable moyen à fin, rougeâtre, effervescente au HCL 10 %	
15,2 – 16,8		Sable moyen à fin, rougeâtre, avec quelques petits cailloux calcaires très anguleux, matrice légèrement effervescente au HCL 10 %	
16,8 – 18,3		Pas d'échantillon	
18,3 – 21,3	Sable fin à très fin brun rouge, présence de gravier fin	Pas d'échantillon	
21,3 – 22,9	Sable fin à très fin brun rouge	Sable moyen, rougeâtre pâle, matrice effervescente au HCL 10 %	
22,9 – 24,4		Sable moyen, rougeâtre pâle, matrice légèrement effervescente au HCL 10 %	
24,4 – 27,4		Pas d'échantillon	
27,4 – 29,0		Sable moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
29,0 – 30,5		Sable fin, beige, avec quelques granules de grès calcaire sub-arrondies et de roches clastiques ou volcano-clastiques grisâtres, effervescence au HCL 10 %	
30,5 – 33,5		Pas d'échantillon	
33,5 – 36,6		Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %	
36,6 – 39,6		Pas d'échantillon	
39,6 – 41,1		Sable fin à grossier, présence à traces de gravier	Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %
41,1 – 42,7			Sable grossier à moyen, beige, avec quelques graviers calcaires gris au diamètre de 1,5 à 2 cm, effervescence au HCL 10 %
42,7 – 45,7	Sable fin à très fin brun rouge	Pas d'échantillon	
45,7 – 47,2		Sable moyen à fin, beige, effervescence au HCL 10 %	
47,2 – 48,8		Sable fin, beige, effervescence au HCL 10 %	
48,8 – 51,8		Pas d'échantillon	
51,8 – 53,3		Sable fin, beige, effervescence au HCL 10 %	
53,3 – 54,9		Sable fin à très fin brun rouge, présence de gravier	Sable moyen à fin, beige, avec grains de calcaires anguleux, effervescence au HCL 10 %

**Tableau A.31 : Description de la séquence stratigraphique du puits d'observation F-3 de l'île de la Grande Entrée (suite)**

Profondeur (m)	Description lors du forage	Description des échantillons
54,9 – 57,9	Sable fin à très fin brun rouge	Pas d'échantillon
57,9 – 59,4		Sable moyen à fin, beige, effervescence au HCL 10 %
59,4 – 61,0		Sable fin, beige, légère effervescence au HCL 10 %
61,0 – 64,0		Pas d'échantillon
64,0 – 68,6		Sable moyen à fin, beige, effervescence au HCL 10 %
68,6 – 70,1		Pas d'échantillon
70,1 – 73,2		Sable moyen à fin, beige, effervescence au HCL 10 %
73,2 – 74,7		Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %
74,7 – 79,2		Sable moyen à fin, beige, effervescence au HCL 10 %
79,2 – 80,8		Sable fin, beige, effervescence au HCL 10 %
80,8 – 82,3		Sable fin, beige, très légère effervescence au HCL 10 %
82,3 – 83,8		Sable moyen à fin, beige, très légère effervescence au HCL 10 %
83,8 – 88,4		Sable moyen à fin, beige, légère effervescence au HCL 10 %
88,4 – 93,0		Sable fin, beige, légère effervescence au HCL 10 %
93,0 – 94,5		Sable fin à moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %
94,5 – 95,7		Sable, traces de gravier à sable et gravier
95,7 – 96,0	Graviers, avec beaucoup de cailloux de calcaire sub-arrondis à sub-anguleux, avec sable grossier à moyen, présence de fragments précambriens; matrice de sable grossier, délavé, effervescent au HCL 10 %	
96,0 – 97,5	Graviers, avec sable moyen, quelques cailloux striés, présence surtout de fragments de calcaire et de quelques fragments précambriens, quelques-uns façonnés et striés; matrice de sable moyen	
97,5 – 99,1	Sable moyen à grossier, beige, avec cailloux de calcaires possiblement sub-anguleux et sub-arrondis striés, présence de fragments de calcaire et de précambriens; matrice de sable moyen	
99,1 – 99,7	Échantillon de grès broyé : Sable grossier à moyen, beige, avec gravillons généralement de calcaire; effervescent au HCL 10 %	
99,7 – 102,4	Roc : grès rouge	

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 13000004 (F-4)

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.501882  
 LATITUDE: 47.562154  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 4.302



SCHEMA DIFFUSION RESEAU PIEZOMETRIQUE.GP.J. STANDARD.GDT. 16-10-19



Figure A.60 : Schéma d'aménagement du piézomètre 13000004 (F-4), île de la Grande Entrée

**Tableau A.32 : Description de la séquence stratigraphique du puits d'observation F-4 de l'île de la Grande Entrée**

Profondeur (m)	Description lors du forage	Description des échantillons	
0 – 1,5	Sable fin brun-rouge	Sable moyen à fin, rougeâtre, sans effervescence au HCL 10 %	
1,5 – 3,0	Sable fin brun-rouge, traces de gravier	Sable graveleux, rougeâtre, avec cailloux anguleux au diamètre maximal de 1,5 cm, d'origine volcanique, quelques-uns d'origine précambrienne, ciment ferrugineux, sans effervescence au HCL 10 %	
3,0 – 15,2	Sable fin à très fin. Brun-rouge	Sable moyen à fin, rougeâtre, sans effervescence au HCL 10 %	
15,2 – 16,8		Sable moyen, légèrement rougeâtre, sans effervescence au HCL 10 %	
16,8 – 21,3		Pas d'échantillon	
21,3 – 24,4		Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %	
24,4 – 27,4		Pas d'échantillon	
27,4 – 30,5		Sable moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
30,5 – 33,5		Pas d'échantillon	
33,5 – 36,6		Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %	
36,6 – 39,6		Pas d'échantillon	
39,6 – 41,1		Sable moyen, beige, effervescence au HCL 10 %	
41,1 – 42,7		Sable moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
42,7 – 45,7		Pas d'échantillon	
45,7 – 47,2		Sable moyen à fin, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
47,2 – 48,8		Sable moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
48,8 – 51,8		Pas d'échantillon	
51,8 – 53,3		Sable moyen à fin, beige, légère effervescence au HCL 10 %	
53,3 – 54,3		Pas d'échantillon	
54,3 – 54,9		Sable grossier et gravier	
54,9 – 57,9		Sable fin brun-rouge	
57,9 – 59,4			Sable moyen, beige, légère effervescence au HCL 10 %
59,4 – 61,6	Sable moyen, beige, avec quelques graviers épars, calcaires et précambriens, au diamètre maximal de 1 cm		
61,6 – 66,1	Roc : grès rouge	Gravillons, beige, grains calcaires arrondis à anguleux, au diamètre maximal de 1 cm	

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 13000005 (Grande-Entrée)

MUNICIPALITÉ: **Les Îles-de-la-Madeleine**  
 LONGITUDE: **-61.525758**  
 LATITUDE: **47.56002**  
 NAD: **83**  
 ALTITUDE DU SOL (m): **9.738**

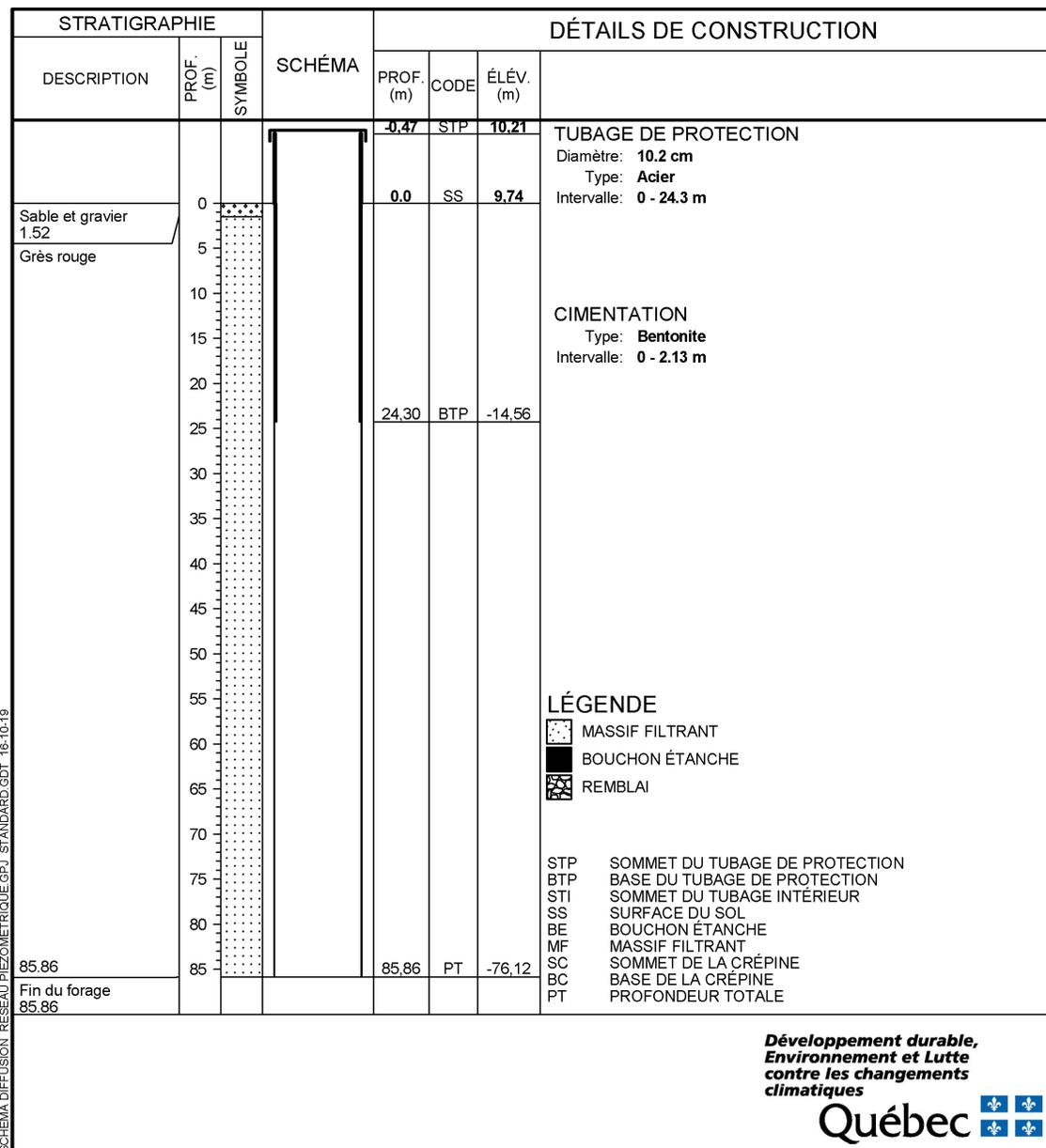


Figure A.61 : Schéma d'aménagement du piézomètre 13000005 (Grande-Entrée), île de la Grande Entrée

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. 1300006 (Étang-du-Nord)

MUNICIPALITÉ: **Les îles-de-la-Madeleine**  
 LONGITUDE: **-61.890639**  
 LATITUDE: **47.361347**  
 NAD: **83**  
 ALTITUDE DU SOL (m): **14.255**

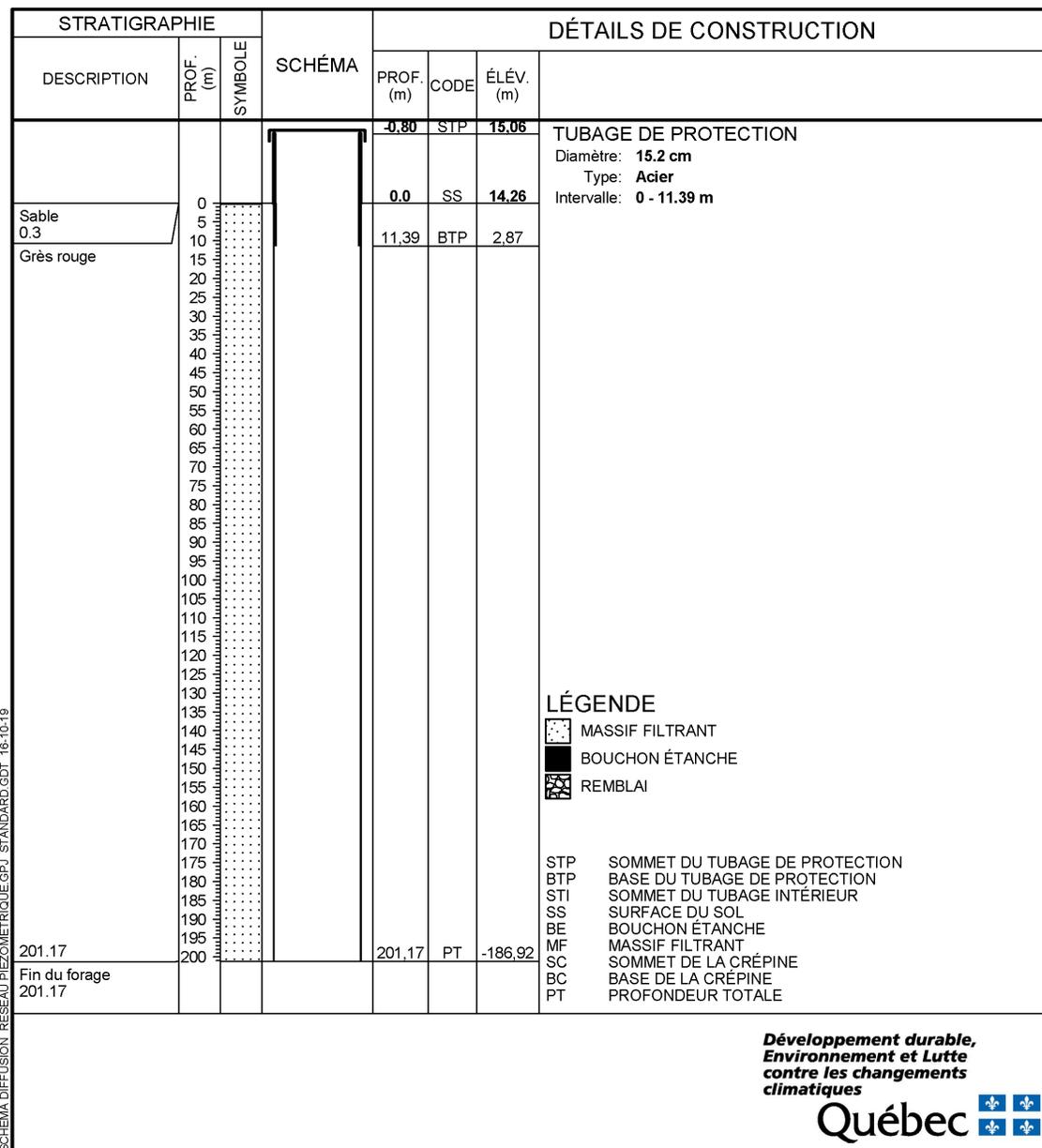


Figure A.62 : Schéma d'aménagement du piézomètre 1300006 (Étang-du-Nord), île du Cap aux Meules

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. Fatima-1

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.905509  
 LATITUDE: 47.399782  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 24.0

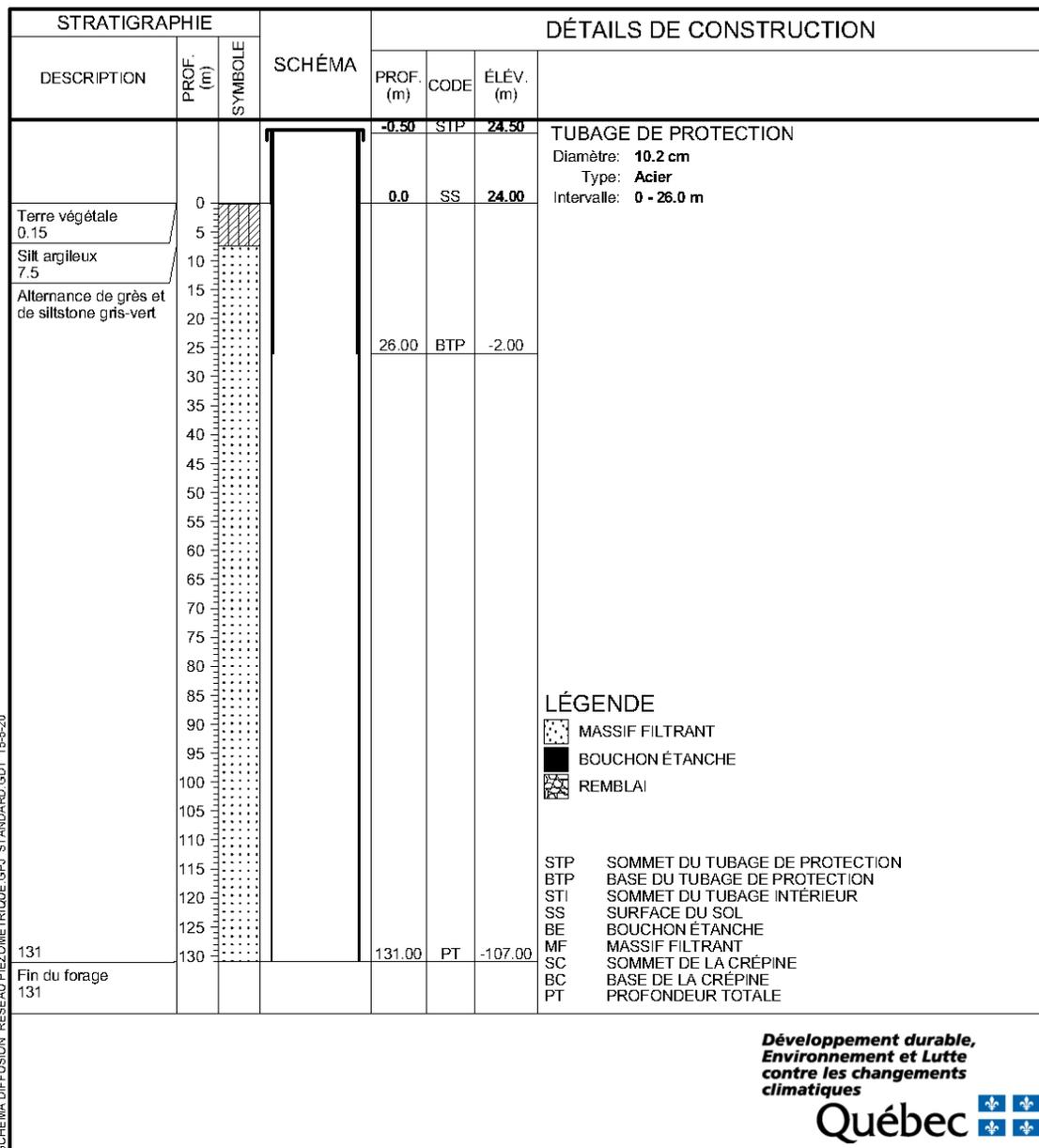


Figure A.63 : Schéma d'aménagement du piézomètre Fatima-1, île du Cap aux Meules

### SCHÉMA DU PIÉZOMÈTRE No. Fatima-2

MUNICIPALITÉ: Les Îles-de-la-Madeleine  
 LONGITUDE: -61.897257  
 LATITUDE: 47.401704  
 NAD: 83  
 ALTITUDE DU SOL (m): 16

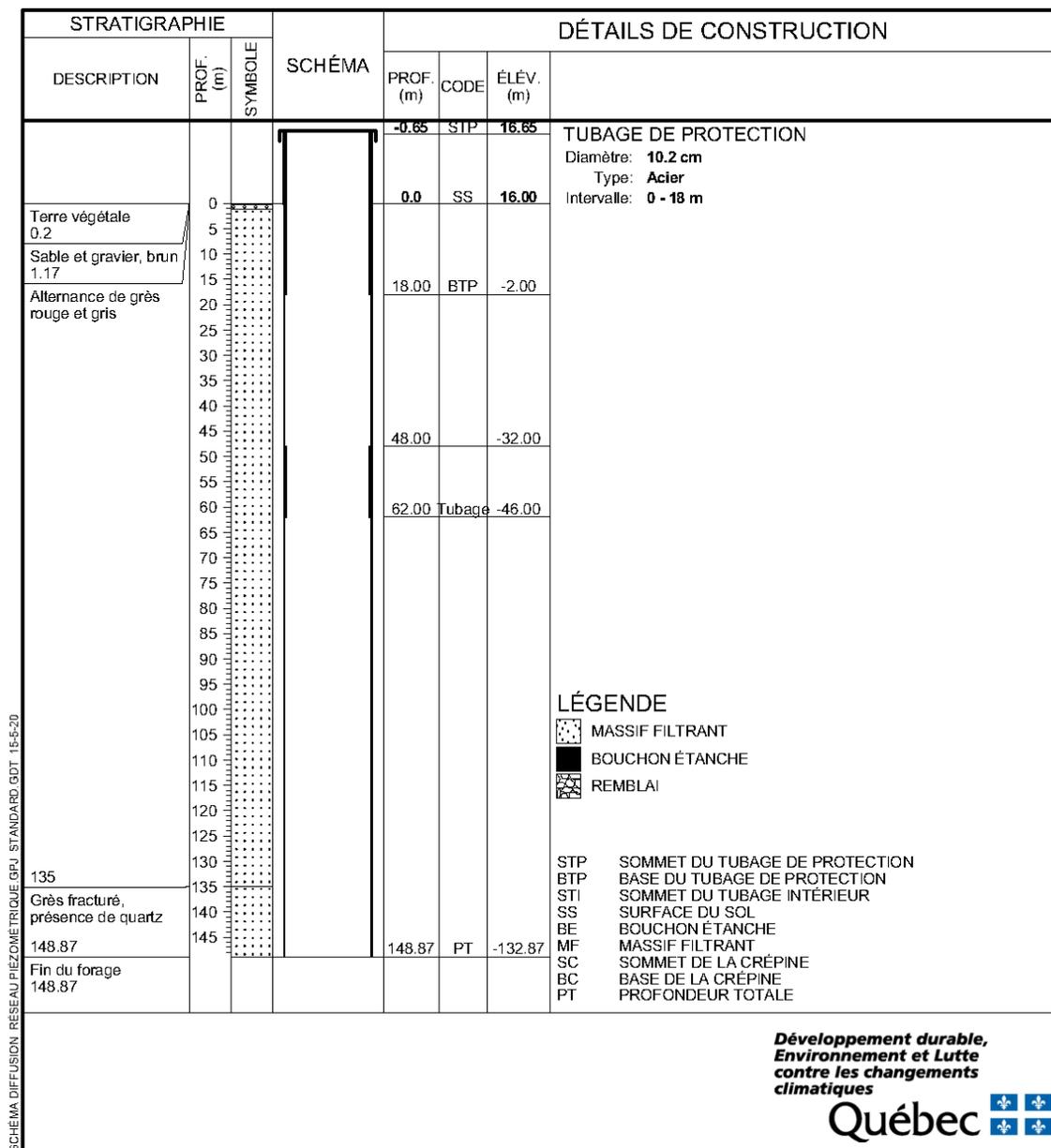


Figure A.64 : Schéma d'aménagement du piézomètre Fatima-2, île du Cap aux Meules

## **Annexe 9 : Méthodologie pour l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles**

La méthodologie pour estimer l'épaisseur des dépôts meubles des îles principales rocheuses et habitées est inspirée du protocole des PACES intitulé *Protocole pour la préparation des livrables 15 - Estimation de l'épaisseur des formations superficielles et 16 - Topographie du roc* (Benoit et coll., 2012).

### **Source des données**

Les sommes de l'épaisseur de chaque couche de sédiments, inclus dans les descriptions stratigraphiques des forages compilés dans la base de données hydrogéologiques, ont constitué les données de base pour estimer l'épaisseur des dépôts meubles des îles de la Madeleine. Les 828 forages concernés proviennent de sources diverses, dont le SIH, le RSESQ, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et de nombreux rapports d'étude. Les 384 affleurements issus du SIGÉOM du MERN pour l'archipel ont aussi servi de données de base.

D'autres informations pertinentes ont permis d'améliorer les résultats de l'estimation, incluant les profils de résistivité électrique de Comte (2008) sur l'île de la Grande Entrée, réinterprétés par Yrro et coll. (2020), les polygones de la roche en place de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18) et l'imagerie aérienne, montrant les falaises rocheuses en bordure de côte.

Les élévations du sol du MAN (Carte 5), la géologie du socle rocheux (Carte 16) et la géologie des formations superficielles (Carte 18) sont toutes des connaissances ayant permis de juger de la validité des données de base, de même que de la cohérence des résultats de l'estimation. Ces derniers ont aussi pu être comparés aux estimations réalisées pour l'île de la Grande Entrée par le Groupe Madelin'Eau (2009) et par Yrro et coll. (2020).

### **Validation des données**

Afin de réaliser l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles, il faut d'abord nettoyer la base de données en excluant les mesures problématiques. Ces problèmes peuvent être d'ordres divers, par exemple une mauvaise localisation, une incohérence dans la description stratigraphique, une erreur de mesure, ou simplement que le forage n'est pas assez profond pour atteindre le roc et bien représenter l'épaisseur totale des dépôts meubles. Un processus rigoureux de validation des données a été mis en place pour sélectionner les données pertinentes à utiliser pour l'estimation.

Le Tableau A.33 montre les statistiques des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles des données brutes et des données validées.

**Tableau A.33 : Statistiques des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles des forages avant, pendant et après le processus de validation**

Paramètre	Données brutes	Après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques	Données validées
Nombre	828	490	427
Minimum	0,0	0,0	0,0
1 <sup>er</sup> quartile	1,5	0,0	0,0
Médiane	2,7	2,4	1,9
3 <sup>e</sup> quartile	5,1	6,0	4,3
Maximum	99,7	99,7	99,7
Moyenne	5,4	5,3	3,8
Écart-type	9,3	10,1	7,4

### **Critères de validation de la base de données hydrogéologiques**

La base de données hydrogéologiques contient des critères de validation, tels que décrits dans le protocole des PACES intitulé *Protocole de fiabilité et validation des données de forage* (Lambert et coll., 2010). Ces critères de validation ont pour objectif de juger de l'exactitude de l'information. Les forages qui répondaient aux critères suivants ont été rejetés :

- *VL1 – Cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique* : Conflit spatial avec le réseau hydrographique (à l'intérieur d'un polygone du réseau hydrographique de la Carte 7), à plus de 10 m de la rive;
- *VT1 – Cohérence de la profondeur des forages avec l'épaisseur totale des couches stratigraphiques* : Différence entre la profondeur totale du forage et le total de l'épaisseur des couches stratigraphiques supérieur à 1 m;
- *VT2 – Cohérence de la stratigraphie* : Description stratigraphique montrant une séquence de roc au-dessus des dépôts meubles.

Ainsi, 26 forages sur les 828 initiaux ont été exclus, ce qui laisse un échantillon de 802 forages.

### **Forages qui n'atteignent pas le roc**

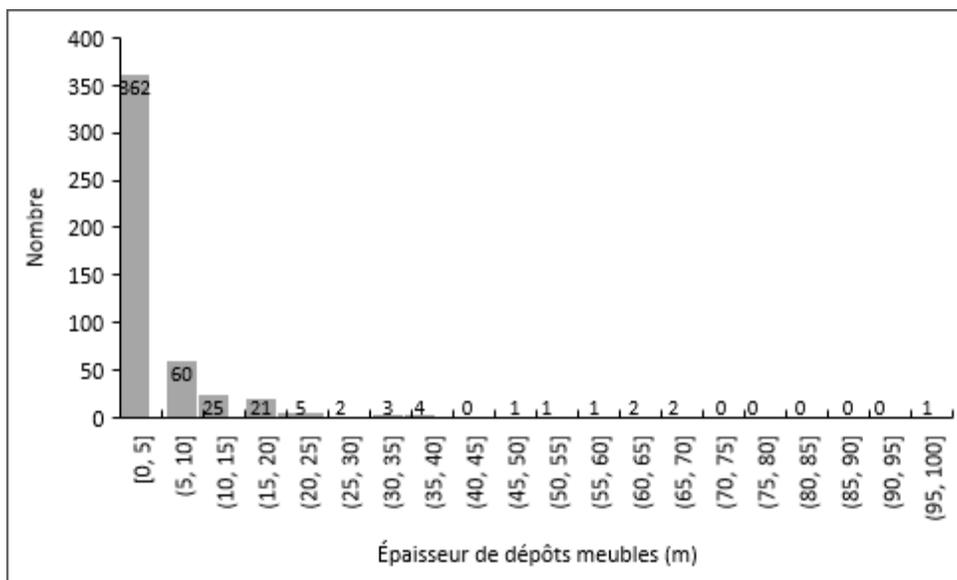
Parmi les 802 forages restants, 312 n'étaient pas assez profonds pour atteindre le roc. C'était souvent le cas, par exemple, pour les sondages géotechniques réalisés dans le cadre de construction d'infrastructures routières ou autres. Ces forages ont toutefois été conservés dans un échantillon à part pour servir de points de contrôle pour l'estimation, au besoin.

Au terme de cette étape, il est resté 490 forages atteignant le roc.

### **Valeurs aberrantes**

L'analyse des statistiques du Tableau A.33 et de la distribution des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles des forages, présentée à l'histogramme de la Figure A.65, a ensuite permis d'identifier quelques valeurs aberrantes. La distribution log-normale montre que 98,6 % des valeurs étaient inférieures à 50 m et que 95,5 % étaient inférieures à 20 m, ce qui correspondait respectivement à 7 et 22 forages sur les

490. Ces valeurs extrêmes n'ont pas été rejetées automatiquement, mais ont été vérifiées avec une attention soutenue lors des prochaines étapes de validation.



**Figure A.65 : Distribution des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles des 490 forages restants après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques**

#### ***Filtration semi-automatique à l'aide d'une moyenne mobile***

Une moyenne mobile a été employée pour identifier les valeurs d'épaisseur de dépôts meubles des forages qui s'éloignaient significativement de celles des forages voisins. Cela signifie que ces forages étaient possiblement mal localisés. Pour le calcul de la moyenne mobile, un rayon de recherche de 250 m a été utilisé, et une densité minimale de 3 forages dans le rayon de recherche était nécessaire. Les valeurs s'éloignant de 5 m ou plus de la moyenne mobile ont été mises en évidence. Un écart-type mobile a aussi été calculé, avec un rayon de recherche de 250 m et une densité minimale de 5 forages, ce qui a permis d'identifier les forages dont les valeurs étaient supérieures à 2 fois l'écart-type local.

Tout comme les valeurs aberrantes de l'étape précédente, les forages significativement différents de leurs voisins n'ont pas été rejetés automatiquement, mais ont été vérifiés avec une attention particulière lors des prochaines étapes de validation.

#### ***Filtration visuelle***

Étant donné le nombre peu élevé de forages comparativement aux autres régions des PACES au Québec, il a été possible de visualiser dans un SIG la localisation de chacun des 490 forages et de juger de la validité de leur valeur d'épaisseur des dépôts. Pour émettre ce jugement professionnel, les valeurs des forages voisins ont été comparées, et la cohérence des épaisseurs en lien avec les connaissances géologiques du territoire d'étude, telles que les élévations du sol du MAN (Carte 5), la géologie du socle rocheux (Carte 16) et la géologie des formations superficielles (Carte 18), a été analysée.

Le choix de conserver ou rejeter un forage s'est appuyé sur les critères suivants :

- La fiabilité de la donnée selon la source : Selon la cote de fiabilité *FS1 – Provenance de l'information* contenue dans la base de données hydrogéologiques, telle que décrite dans le protocole des PACES intitulé *Protocole de fiabilité et validation des données de forage* (Lambert et coll., 2010). En cas de conflit entre valeurs voisines, le ou les forages provenant d'une source jugée « plus fiable » (RSESQ, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, rapports d'étude) étaient conservés et les forages provenant d'une source jugée « moins fiable » (SIH) étaient rejetés.
- La cohérence de la description stratigraphique : Malgré le critère de validation *VT2 – Cohérence de la stratigraphie* contenue dans la base de données hydrogéologiques, certaines descriptions stratigraphiques incohérentes n'avaient pas été initialement identifiées. Quelques forages avaient une couche stratigraphique de mélange de sédiments et de roc, et d'autres avaient des couches avec description inconnue. Ces descriptions imprécises ne permettaient pas d'établir l'épaisseur réelle des dépôts meubles et ont été écartées.
- Les zones de remblais : Certains polygones de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18) sont identifiés comme zones de remblais desquels il n'a pas été possible de déterminer le type de sédiments en surface. Il s'agit notamment des secteurs portuaires de Cap-aux-Meules et de Grande-Entrée, ainsi que de celui près du pont entre les îles du Cap aux Meules et du Havre aux Maisons. À ces endroits, plusieurs forages montrent des dépôts meubles épais, mais il a été suspecté que d'importants travaux de remblayages en soient responsables et ne représenteraient pas l'épaisseur naturelle des dépôts meubles. Les forages dans ces secteurs localisés ont été rejetés.
- La localisation dans la mer, sur une large plage ou sur une île : Malgré le critère de validation *VL1 – Cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique* contenue dans la base de données hydrogéologiques, certains forages étaient situés dans la mer, mais à moins de 10 m de la rive. Pour certains de ces forages, la valeur d'épaisseur des dépôts meubles était significativement différente de leurs voisins. Ces forages ont été rejetés, car leur localisation serait erronée. Les forages prétendument situés sur de larges plages et qui montraient les mêmes attributs que les précédents ont aussi été retirés, de même que ceux situés sur des îles marginales qui n'étaient pas d'intérêt pour l'estimation des dépôts meubles des îles rocheuses principales et habitées.
- La cohérence de l'adresse : Pour certains forages issus du SIH, l'adresse était disponible. Celle-ci a été comparée avec celle du lot, tel qu'indiqué par la matrice graphique de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, correspondant aux coordonnées géographiques du forage. Une quinzaine de forages mal localisés ont ainsi été identifiés.
- La cohérence de la profondeur au roc avec la cartographie des formations géologiques superficielles : Utilisation du critère de validation *VL2 – Cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec la cartographie des zones d'affleurement et de till mince*. Lorsqu'un forage est situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18) et montre une épaisseur de dépôts supérieure à 10 m, un doute sur la validité de sa localisation s'installe. Dans ce cas, et même pour les épaisseurs entre 5 et 10 m, un jugement professionnel était fait, en se basant sur les autres connaissances du territoire, pour conserver ou rejeter le forage.

Les élévations du socle rocheux, obtenues en soustrayant les épaisseurs de dépôts meubles des forages par les élévations du sol du MAN (Carte 5), ont aussi été comparées selon les critères ci-dessus. Cela a permis d'identifier quelques forages problématiques supplémentaires à rejeter.

La filtration visuelle s'est conclue avec 63 forages sur les 490 à exclure, laissant un échantillon de 427 forages validés à utiliser pour l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles.

Les statistiques des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles validées sont montrées au Tableau A.33, et leur distribution est présentée à l'histogramme de la Figure A.66. La moyenne et les quartiles démontrent que les dépôts meubles de l'échantillon des données validées sont plus minces. Des 22 valeurs supérieures à 20 m jugées potentiellement aberrantes précédemment, il n'en reste plus que 9. Celles-ci appartiennent toutes à des forages localisés dans la vallée glaciaire de l'île de la Grande Entrée.

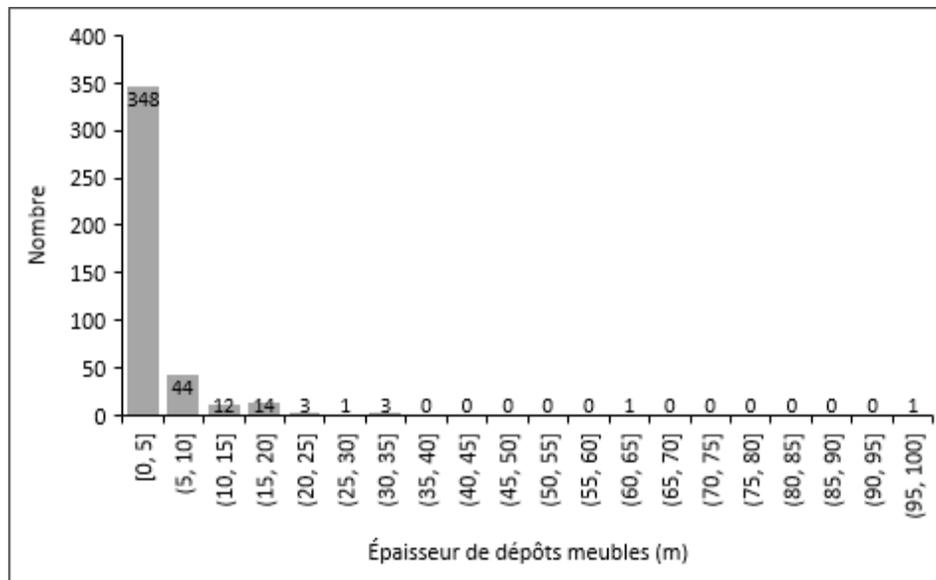


Figure A.66 : Distribution des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles des 427 forages validés

### Validation des affleurements

Les affleurements du SIGÉOM ont été validés pour leur localisation selon leur cohérence avec le réseau hydrographique. Les affleurements positionnés dans la mer ont été écartés, ainsi que ceux sur des îles et presqu'îles marginales qui n'étaient pas d'intérêt pour l'estimation des dépôts meubles des îles rocheuses principales et habitées. Ceux localisés dans l'unité des tombolos de sable sur la carte de la géologie du socle rocheux (Carte 16) ont aussi été rejetés. Étant donné la faible épaisseur des formations géologiques superficielles constatée par Dubois et Parent (en révision), la cohérence des affleurements du SIGÉOM dans les polygones de la roche en place et de till mince de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18) n'a pas été investiguée. Il a été présumé que les affleurements rocheux sont possibles partout aux îles de la Madeleine, même dans les formations géologiques superficielles telles que les sédiments glacio-marins ou les sédiments littoraux et pré-littoraux, que l'on retrouve souvent en épaisseur plus grande ailleurs au Québec.

Sur les 384 affleurements initiaux, 48 ont été exclus, ce qui laisse 333 affleurements valides à ajouter à l'échantillon des 427 forages validés pour la suite des travaux.

## **Interpolation**

### **Zonage**

Les épaisseurs des dépôts meubles ont été estimées de manière indépendante pour chacune des sept îles rocheuses principales et habitées, selon les sous-échantillons des données correspondantes. Les secteurs des dunes ont été exclus. Le Tableau A.34 présente entre autres le nombre de forages et d’affleurements validés pour chaque île ayant servi aux estimations.

**Tableau A.34 : Nombre et densité des observations par île ayant servi à l’interpolation de l’épaisseur des dépôts meubles**

Île	Nombre de forages validés	Nombre d’affleurements validés	Nombre de points de contrôle	Nombre total d’observations	Superficie approximative de l’île (km <sup>2</sup> )	Densité des observations (nombre/km <sup>2</sup> )
Grande Entrée	48	12	96	156	38	4
Grosse Île aux Loups	49	26	9	84	114	1
Havre aux Maisons	5	5	0	10	1	14
Cap aux Meules	28	88	5	121	25	5
Havre Aubert	235	91	6	332	60	6
d’Entrée	44	99	5	148	55	3
	2	12	12	29	2	13
<b>Total</b>	<b>411</b>	<b>333</b>	<b>133</b>	<b>877</b>	<b>292</b>	<b>3</b>

### **Ajout de points de contrôles**

En considérant les sous-échantillons des données validées, certains secteurs des îles n’avaient pas d’observations en nombre et densité suffisants pour réaliser une estimation fiable et comblant l’ensemble du territoire. C’était le cas notamment sur le pourtour de la plupart des îles, et aussi au centre et au nord-est de l’île de la Grande Entrée. Des points de contrôle, correspondant à des mesures ou estimations indirectes de l’épaisseur des dépôts meubles, ont été ajoutés aux sous-échantillons des données pour améliorer le résultat de l’estimation (Tableau A.34). Ces 133 points de contrôles comprennent :

- Des affleurements en bordure de côte, sur des falaises apparentes par imagerie aérienne;
- Des affleurements sur les polygones de la roche en place de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18);
- Des forages qui n’atteignent pas le roc, pour les endroits où un premier résultat d’interpolation montre une épaisseur des dépôts meubles plus faible que la profondeur du forage;
- Des interprétations de profondeur du roc des profils de résistivité électrique (Comte, 2008; Yrro et coll., 2020), à l’île de la Grande Entrée seulement.

Pour les profils de résistivité électrique sur l’île de la Grande Entrée, des épaisseurs de dépôts meubles interprétés par Yrro et coll. (2020) ont été fournis le long des levés à environ tous les 1 m de distance,

ce qui correspond à 2 562 observations. Les points de contrôle, au nombre de 84, ont été sélectionnés à un intervalle approximatif de 50 m le long des levés, afin de constituer un compromis entre une représentation adéquate de la variabilité des épaisseurs observées et l'ajout d'un nombre trop important de points de contrôle relativement aux mesures existantes.

Au total, le Tableau A.34 indique que 877 observations ont été utilisées pour l'interpolation des épaisseurs de dépôts meubles, ce qui correspond à une densité moyenne de 3 points par km<sup>2</sup>. La Figure A.67 montre la distribution spatiale et les épaisseurs des dépôts meubles des forages, des affleurements et des points de contrôle retenus pour l'interpolation. On y constate que la couverture est relativement uniforme.

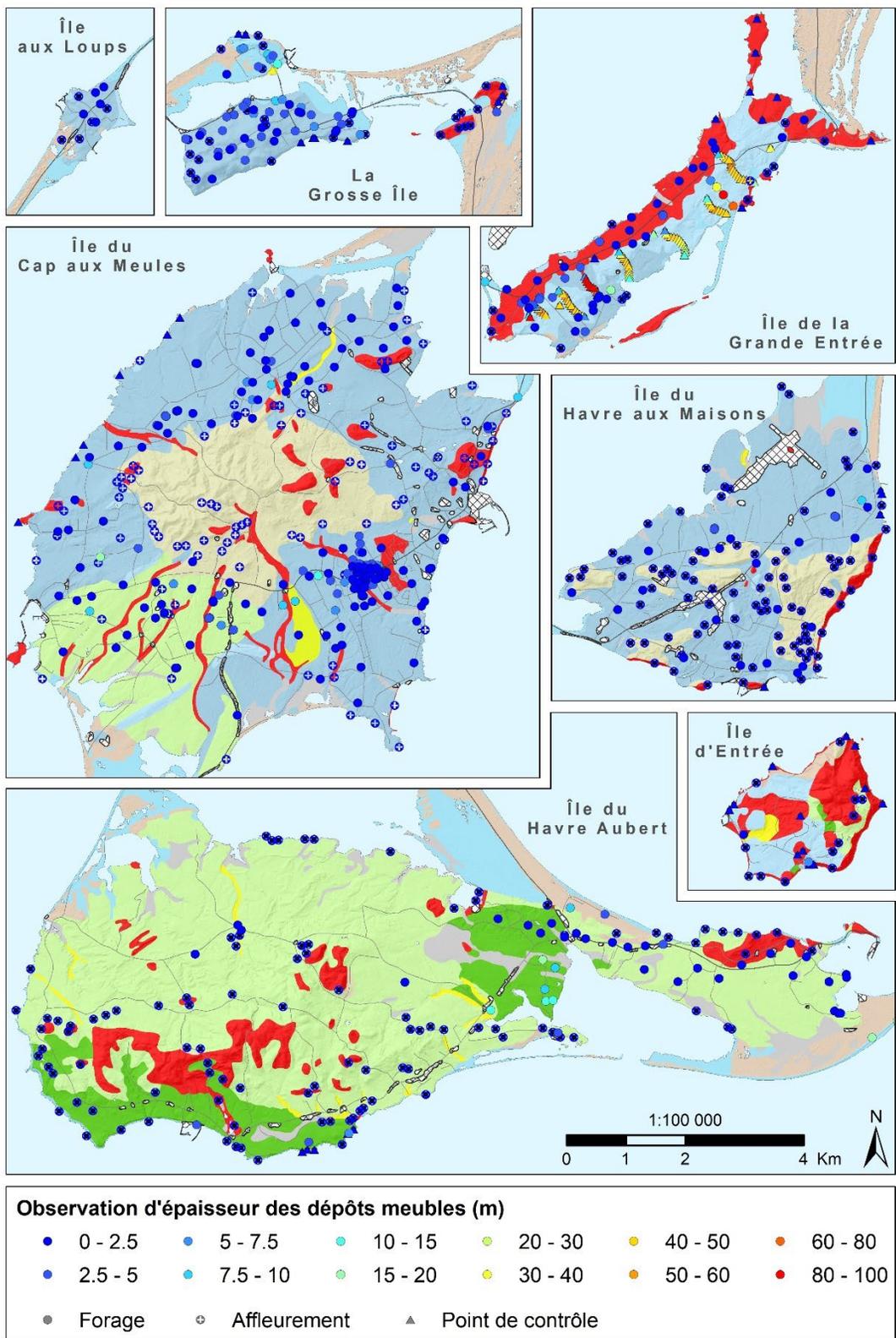


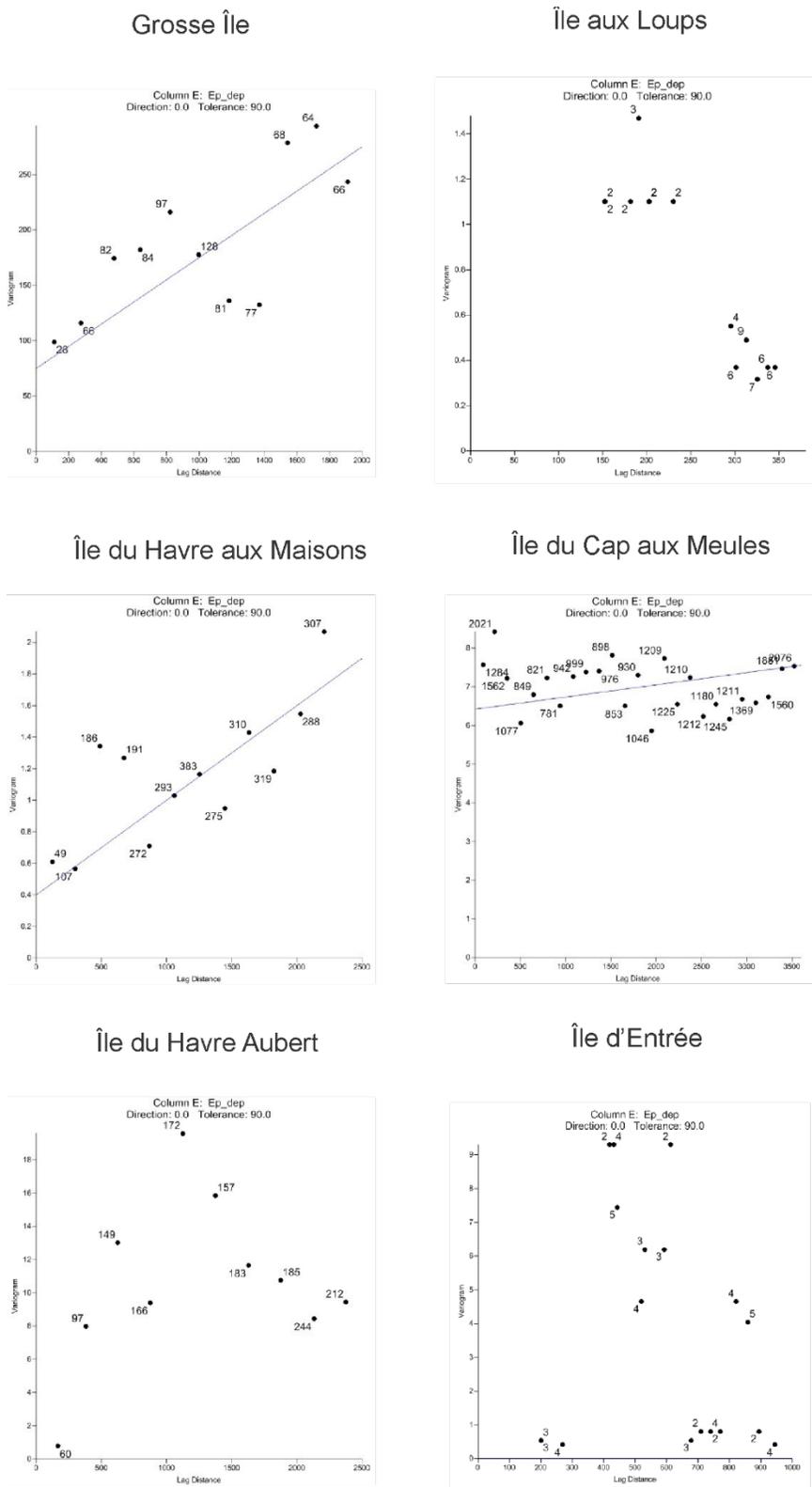
Figure A.67 : Observations d'épaisseur de dépôts meubles retenus pour l'interpolation (pour la légende des formations géologiques superficielles en fond de carte, voir la Figure 5.19)

### **Analyse de la corrélation spatiale**

Une continuité spatiale existe pour une variable telle que l'épaisseur des dépôts meubles. Cette continuité devrait donc s'exprimer par une corrélation spatiale entre les données, c'est-à-dire que les mesures les plus près l'une des autres seraient plus semblables que les données plus distantes. Cette corrélation peut s'investiguer en calculant des semi-variogrammes expérimentaux pour chaque île. Le logiciel *Surfer version 12* de *Golden Software* a été utilisé pour se faire. Lorsqu'une corrélation spatiale est observée, un modèle théorique peut être ajusté afin de servir dans le calcul ultérieur de l'estimation, tel que requis par une méthode d'interpolation comme le krigeage.

Pour la Grosse Île et l'île du Havre aux Maisons, les semi-variogrammes omni-directionnels (Figure A.68) ont montré que la corrélation diminue avec la distance, mais la fonction linéaire pouvant être modélisée était imprécise. De plus, aucun palier n'a semblé être atteint. Pour les îles du Cap aux Meules et du Havre Aubert, la corrélation spatiale a semblé pratiquement inexistante; on y a observé qu'un effet pépité (Figure A.68). Pour les îles aux Loups et d'Entrée, le faible nombre d'observations a fait en sorte qu'il n'y avait pas suffisamment de paires de mesures pour une analyse adéquate de la corrélation spatiale (Figure A.68). Puisque qu'aucun modèle théorique fiable n'a pu être ajusté, il a été jugé préférable d'utiliser une méthode plus simple que le krigeage pour interpoler les épaisseurs des dépôts meubles pour ces îles.

La faible plage de valeurs (épaisseurs de dépôts meubles de 15 m et moins) était possiblement en partie responsable de ces mauvaises corrélations spatiales. Les dépôts meubles étant généralement minces sur le territoire d'étude, l'erreur de mesure en forage serait proportionnellement importante. De plus, sur l'île du Cap aux Meules, là où la densité de données est la plus élevée parmi les grandes îles (Tableau A.34), des effets pépités ont été remarqués visuellement dans la distribution spatiale des données (Figure A.67), ce qui a contribué à diminuer la corrélation spatiale globale des données.



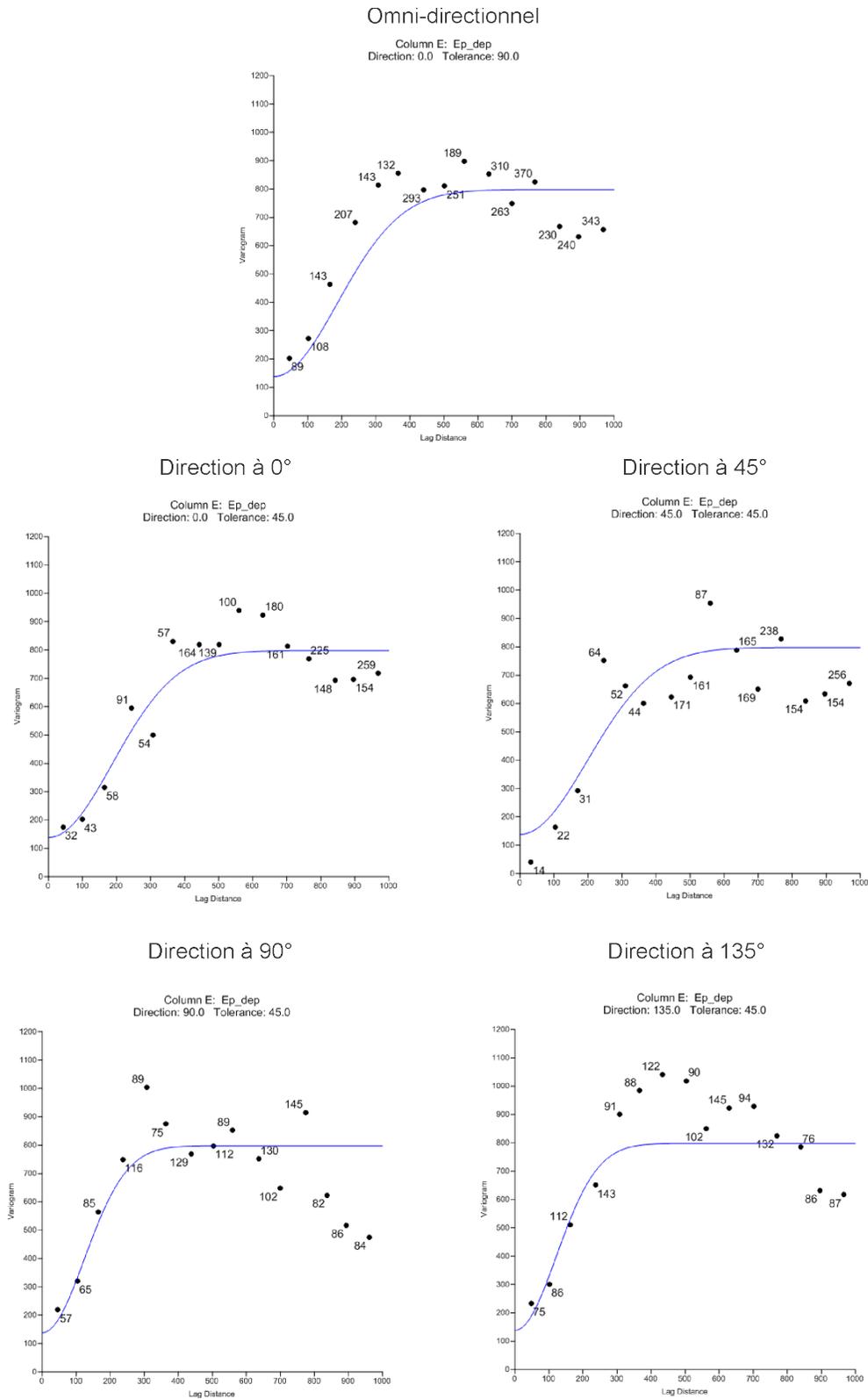
**Figure A.68 : Semi-variogrammes expérimentaux omni-directionnels des observations pour chaque île habitée, à l'exception de l'île de la Grande Entrée**

La modélisation d'un semi-variogramme théorique s'est avérée possible pour les données de l'île de la Grande Entrée, qui possédait une densité d'observations beaucoup plus grande, compte tenu de l'ajout de nombreux points de contrôle le long des profils de résistivité électrique, ainsi qu'une plage de valeurs beaucoup plus étendue que les autres îles (épaisseurs de dépôts meubles jusqu'à près de 100 m).

Un semi-variogramme omnidirectionnel a d'abord été calculé, suivi de semi-variogrammes directionnels pour investigation de l'anisotropie spatiale (Figure A.69). Le modèle théorique ajusté et ses paramètres sont indiqués au Tableau A.35. À noter qu'une anisotropie spatiale de 2 a été observée dans l'angle de 25°, ce qui signifie que la corrélation spatiale s'étend sur une distance 2 fois plus grande dans cette direction que la direction perpendiculaire, soit dans l'angle de 115°. Ceci est observable sur la Figure A.67, où l'on a pu constater que les valeurs d'épaisseur de dépôts meubles variaient plus rapidement dans l'axe nord-nord-ouest – sud-sud-est (115°) que dans l'axe est-nord-est – ouest-sud-ouest (25°).

**Tableau A.35 : Modèle théorique ajusté pour le semi-variogramme des observations de l'île de la Grande Entrée**

<b>Modèle théorique</b>	<b>Effet pépite (m)</b>	<b>Seuil (m)</b>	<b>Portée (m)</b>	<b>Anisotropie géométrique</b>	<b>Angle anisotropique (°)</b>
Gaussien	138	660	327	2	25



**Figure A.69 : Semi-variogrammes expérimentaux et modélisés, omni-directionnel et directionnels, des observations pour l'île de la Grande Entrée**

### **Choix de la méthode d'interpolation et des paramètres de recherche**

Pour les 6 îles autres que celle de la Grande Entrée, la méthode d'interpolation par pondération inverse à la distance a été retenue pour estimer les épaisseurs des dépôts meubles. Le logiciel *ArcGIS version 10.3.1* d'*Esri* a été utilisé pour se faire. Cette méthode permet certains ajustements intéressants :

- La pondération par rapport à la distance;
- La distance du rayon de recherche;
- Le nombre de points de recherche à utiliser dans le cercle de recherche.

L'ajustement de ces paramètres en fonction des connaissances de l'utilisateur du jeu de données et du contexte géologique du territoire peut permettre d'obtenir une estimation se rapprochant davantage de la réalité.

De nombreux calculs d'interpolation ont été faits pour déterminer le meilleur ajustement possible des paramètres mentionnés ci-dessus. La comparaison entre les différents tests s'est faite visuellement dans un SIG, en utilisant différentes légendes, avec classes de valeur différentes, et en accordant une attention particulière aux aspects suivants : les effets « bull's eye », la distance de l'impact des mesures significativement différentes de leurs voisins (ex. zone estimée de dépôts profonds qui s'éloigne trop loin des mesures profondes, au-delà de mesures non-profondes), et la douceur (smoothness) de l'interpolation. Le meilleur compromis trouvé entre la distance des observations à utiliser et leur pondération correspondait à l'ajustement des paramètres indiqués au Tableau A.36. Les paramètres choisis étaient identiques pour chacune des îles.

**Tableau A.36 : Ajustement des paramètres de recherche pour l'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles des îles habitées par pondération inverse à la distance, à l'exception de l'île de la Grande Entrée**

<b>Puissance (pondération)</b>	<b>Variabilité du rayon de recherche</b>	<b>Distance du rayon de recherche (m)</b>	<b>Nombre minimal d'observations à utiliser dans le cercle de recherche</b>
3	Fixe	2 500	1

Le choix de la puissance de 3, qui est relativement élevée, a fait en sorte que la pondération des observations les plus éloignées était faible et que ce sont les observations les plus proches qui avaient le plus d'influence sur l'estimation. Inversement, l'utilisation d'un grand rayon de recherche de 2 500 m, avec l'utilisation de toutes les observations disponibles à l'intérieur du cercle de recherche, a permis de contrebalancer l'effet exagéré que pourrait avoir la pondération élevée des données les plus proches. La distance de 2 500 m correspondait approximativement à la distance maximale à laquelle une corrélation spatiale semble être observée dans les semi-variogrammes (Figure A.68).

Compte tenu de la modélisation possible du semi-variogramme des données de l'île de la Grande Entrée, la méthode d'interpolation par krigeage ordinaire a pu être employée. Le logiciel *Surfer version 12* de *Golden Software* a été utilisé pour se faire. Tout comme pour la méthode par pondération inverse à la distance, les paramètres de recherche peuvent être ajustés pour améliorer l'estimation. De nombreux

tests ont été effectués et comparés visuellement dans un SIG. Le Tableau A.37 présente les paramètres retenus.

**Tableau A.37 : Ajustement des paramètres de recherche pour l'interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles de l'île de la Grande Entrée par krigeage ordinaire**

Longueur du rayon du grand axe de l'ellipse de recherche (m)	Angle de l'ellipse de recherche (°)	Longueur du rayon du petit axe de l'ellipse de recherche (m)	Nombre maximal d'observations maximales à utiliser dans l'ellipse de recherche	Nombre minimal d'observations à utiliser dans l'ellipse de recherche
650	25	325	8	1

Pour que le territoire soit entièrement couvert, il a fallu doubler les rayons de recherche par rapport aux portées anisotropiques du modèle (Tableau A.35). Ainsi, le rayon utilisé dans le grand axe de l'ellipse de recherche, pour lequel la portée modélisée était de 325 m, a été de 650 m. Dans le petit axe de l'ellipse de recherche, le rayon de recherche de 325 m correspondait au double de la portée de 162,5 m.

Le nombre maximal de 8 observations à utiliser dans l'ellipse de recherche est faible, car la portée était courte. En utilisant plus d'observations (ex. : 64 ou tous), l'interpolation se dégradait, mais très légèrement, notamment le long des levés géophysiques où les changements des valeurs des observations variaient très rapidement, sur de courtes distances. Un faible nombre maximal d'observations à utiliser a permis de n'utiliser que celles les plus rapprochées, qui avaient des profondeurs semblables, et d'exclure celles qui étaient relativement près, mais dont les profondeurs étaient plus différentes.

Pour les deux méthodes d'interpolation, un nombre minimal d'observations de 1 dans le cercle ou l'ellipse de recherche implique que même si l'on retrouvait une seule observation, le calcul de l'interpolation pouvait se faire. Bien que ce ne soit généralement pas suffisant pour obtenir une estimation fiable, il s'est avéré nécessaire de permettre ceci pour couvrir l'ensemble du territoire. Il devient alors indispensable pour un utilisateur, en fonction de ses objectifs, de visualiser la densité des observations pour interpréter adéquatement le résultat de l'interpolation.

***Interpolation de l'épaisseur des dépôts meubles***

L'interpolation a été effectuée pour chacune des îles individuellement. Les extensions des grilles d'interpolation, montrée au Tableau A.38, correspondent à un territoire légèrement élargi autour des îles. Les grilles, d'une résolution de 20 m × 20 m, ont été alignées sur la grille du MAN (Carte 5) afin d'avoir une concordance spatiale entre les mailles des différentes couches matricielles. Pour le résultat de l'interpolation par krigeage de l'île de la Grande Entrée seulement, des valeurs négatives d'épaisseur de dépôts meubles ont été obtenues, bien que ce soit physiquement impossible. Ces valeurs ont été remplacées par des valeurs de 0 m.

Les grilles pour chaque île ont ensuite été mosaïquées pour former une seule couche matricielle pour l'archipel. Cette dernière a enfin été découpée selon les limites des îles rocheuses selon la carte de la géologie du socle rocheux (Carte 16). La carte finale est présentée à la Figure 5.8.

**Tableau A.39 : Extension des grilles d'interpolation en projection MTM Zone 4 pour chaque île**

Île	Gauche (m)	Droite (m)	Bas (m)	Haut (m)
Grande Entrée	300 000	307 500	5 266 800	5 272 500
Grosse Île	301 600	307 360	5 274 200	5 277 000
aux Loups	288 500	290 000	5 264 700	5 266 000
Havre aux Maisons	279 100	286 000	5 249 800	5 255 500
Cap aux Meules	269 500	279 100	5 244 500	5 253 800
Havre Aubert	265 000	280 500	5 230 200	5 236 600
d'Entrée	288 100	291 100	5 236 300	5 239 000

### **Validation des résultats**

Seule la méthode d'interpolation par krigeage, utilisée pour l'île de la Grande Entrée, permet de valider quantitativement les estimations, par comparaison des écarts-types de l'erreur de l'estimation et par validation croisée et étude spatiale des résidus.

L'influence sur la qualité de l'interpolation d'une ellipse de recherche anisotrope et du nombre maximal d'observations dans l'ellipse de recherche ont été investigués. Le Test 1, sans anisotropie, avec 64 observations dans l'ellipse de recherche, le Test 2, avec anisotropie et utilisation de toutes les observations, et le Test 3, avec anisotropie et utilisation d'au maximum 8 observations, sont comparés ci-dessous. Le Tableau A.40 présente les paramètres de recherche de ces 3 tests. À noter que les paramètres du Test 3 correspondent à ceux retenus pour l'estimation finale.

**Tableau A.40 : Paramètres de recherche des Tests 1, 2 et 3**

Nom du test	Longueur du rayon du grand axe de l'ellipse de recherche (m)	Angle de l'ellipse de recherche (°)	Longueur du rayon du petit axe de l'ellipse de recherche (m)	Nombre maximal d'observations à utiliser dans l'ellipse de recherche	Nombre minimal d'observations à utiliser dans l'ellipse de recherche
Test 1	650	0	650	64	1
Test 2	650	25	325	Tous	1
Test 3	650	25	325	8	1

Les résultats de l'estimation des Tests 1, 2 et 3 sont présentés à la Figure A.70. L'utilisation d'un rayon plus court du petit axe de l'ellipse de recherche, selon l'anisotropie obtenue par la modélisation du semi-variogramme, a nettement amélioré l'estimation. On observe pour le test 1 une trop grande influence des observations distantes dans l'axe nord-nord-ouest – sud-sud-est. Le nombre maximal d'observations dans l'ellipse de recherche ne semble toutefois pas avoir eu un impact important.

À noter que le nombre d'observations a varié légèrement entre les tests, puisqu'ils ont été effectués en ordre chronologique et que quelques points de contrôle ont été ajoutés d'un test à l'autre pour améliorer l'interpolation et combler l'ensemble du territoire. Étant donné les différences non significatives de la

validation croisée qui suit, il n'a pas été jugé utile de reprendre les tests avec exactement les mêmes observations.

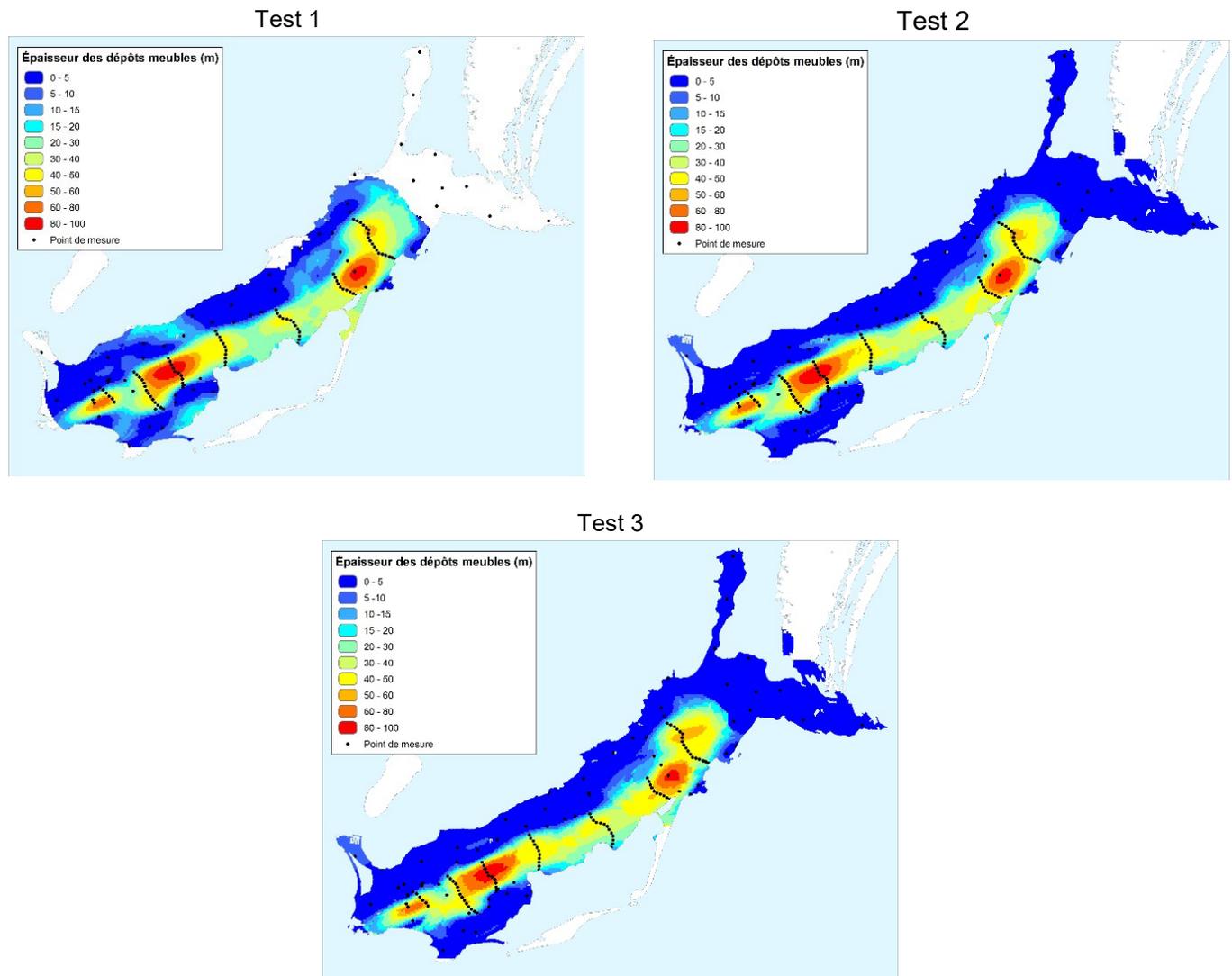
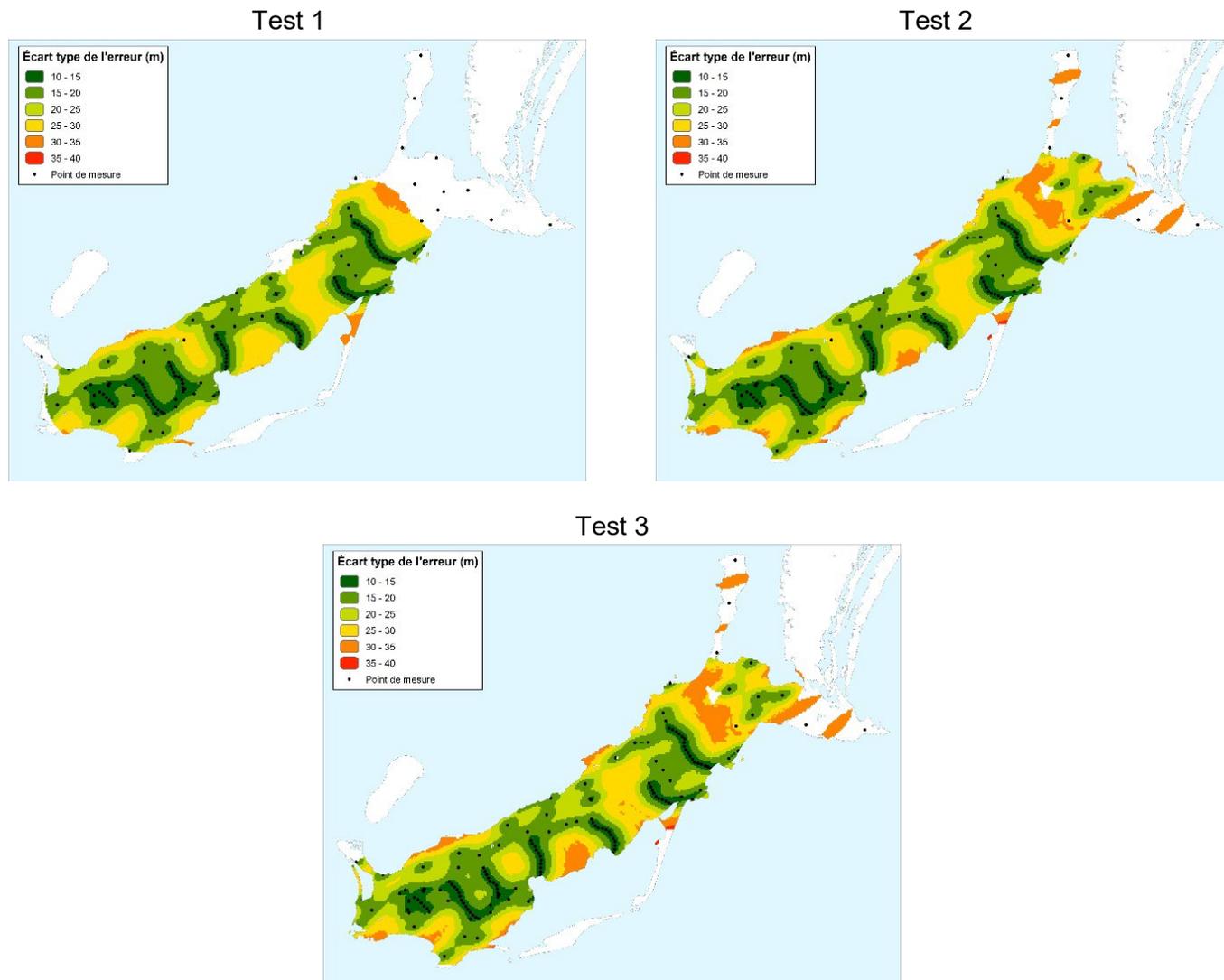


Figure A.70 : Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles de l'île de la Grande Entrée pour les Tests 1, 2 et 3:

Les cartes de l'écart-type de l'erreur de l'estimation sont présentées à la Figure A.71. Elles sont très semblables les unes des autres. À proximité des observations, les écarts-types semblent similaires. Dans les secteurs où il n'y a pas d'observation, des écarts-types un peu plus faibles sont observés pour le Test 1 comparativement au Test 2, qui à son tour est un peu plus faible que le Test 3.



**Figure A.71 : Écart-type de l'erreur de l'estimation pour les Tests 1, 2 et 3**

Les statistiques des mesures, des estimés et des résidus pour les Tests 1, 2 et 3 sont présentées au Tableau A.41. Pour tous les tests, les statistiques des mesures sont différentes de celles des estimés, notamment pour la plage entre le minimum et le maximum qui est plus grand pour les estimés. Ceci s'explique par le fait que des valeurs négatives d'épaisseurs de dépôts meubles sont obtenues, bien que ce soit physiquement impossible. Le premier quartile est un peu plus élevé pour les estimés que les mesures. Les médianes et les moyennes sont très semblables.

**Tableau A.41 : Statistiques des mesures, des estimés et des résidus pour les Tests 1, 2 et 3**

Paramètre	Test 1			Test 2			Test 3		
	Mesures	Estimés	Résidus	Mesures	Estimés	Résidus	Mesures	Estimés	Résidus
Nombre	136	136	136	142	142	142	143	143	143
Min	0,0	-12,4	-71,1	0,0	-13,0	-70,9	0,0	-7,6	-68,4
1 <sup>er</sup> quartile	2,4	11,0	-4,4	1,5	3,5	-3,5	1,5	3,7	-3,8
Médiane	33,1	27,9	0,5	26,2	26,8	0,4	24,8	26,4	0,3
2 <sup>e</sup> quartile	47,7	45,5	7,7	46,9	45,3	4,7	46,9	45,5	5,1
Max	99,7	98,8	61,7	99,7	98,5	61,2	99,7	100,2	62,7
Moyenne	28,2	29,7	1,5	27,0	28,0	1,0	26,8	27,8	1,0
Écart-type	26,3	20,8	16,0	26,4	22,3	15,7	26,4	22,3	15,8
Coefficient d'asymétrie	0,60	0,55	-0,50	0,65	0,47	-0,27	0,67	0,48	-0,18

Les statistiques sont un peu plus différentes pour le Test 1 que pour les Tests 2 et 3, tel que montré par un 1<sup>er</sup> quartile, une médiane et une moyenne plus élevés (Tableau A.41). La seule distinction notable entre les Tests 2 et 3 est la plage légèrement plus grande entre le minimum et le maximum.

L'analyse des résidus par la validation croisée permet de constater que les estimations s'améliorent légèrement d'un test à l'autre, notamment avec des plages de valeur, médianes, moyennes de plus en plus faibles (Tableau A.41). Le coefficient d'asymétrie s'approche aussi un peu plus de 0 pour le Test 3.

Les graphiques des nuages de points de la Figure A.72 montrent la relation entre les mesures et les estimés. La corrélation n'est pas très forte, avec des coefficients de corrélation d'environ 0,65. La droite de régression est très près de la relation 1:1. Les graphiques sont quasi-identiques entre les tests.

Les distributions des résidus montrés sur les histogrammes de la Figure A.73 ressemblent à une fonction normale et ne relèvent aucune différence notable entre les Tests 2 et 3, alors que la distribution est un peu plus évasée pour le Test 1.

La validation quantitative des résultats, par comparaison des écarts-types de l'erreur de l'estimation et par validation croisée et étude spatiale des résidus, ne s'est pas avérée être très révélatrice. Les comparaisons visuelles des résultats à l'aide d'un SIG, en se basant sur les autres connaissances du territoire et en s'appuyant sur le jugement professionnel, ont été déterminantes dans le choix final des paramètres de recherche de l'interpolation.

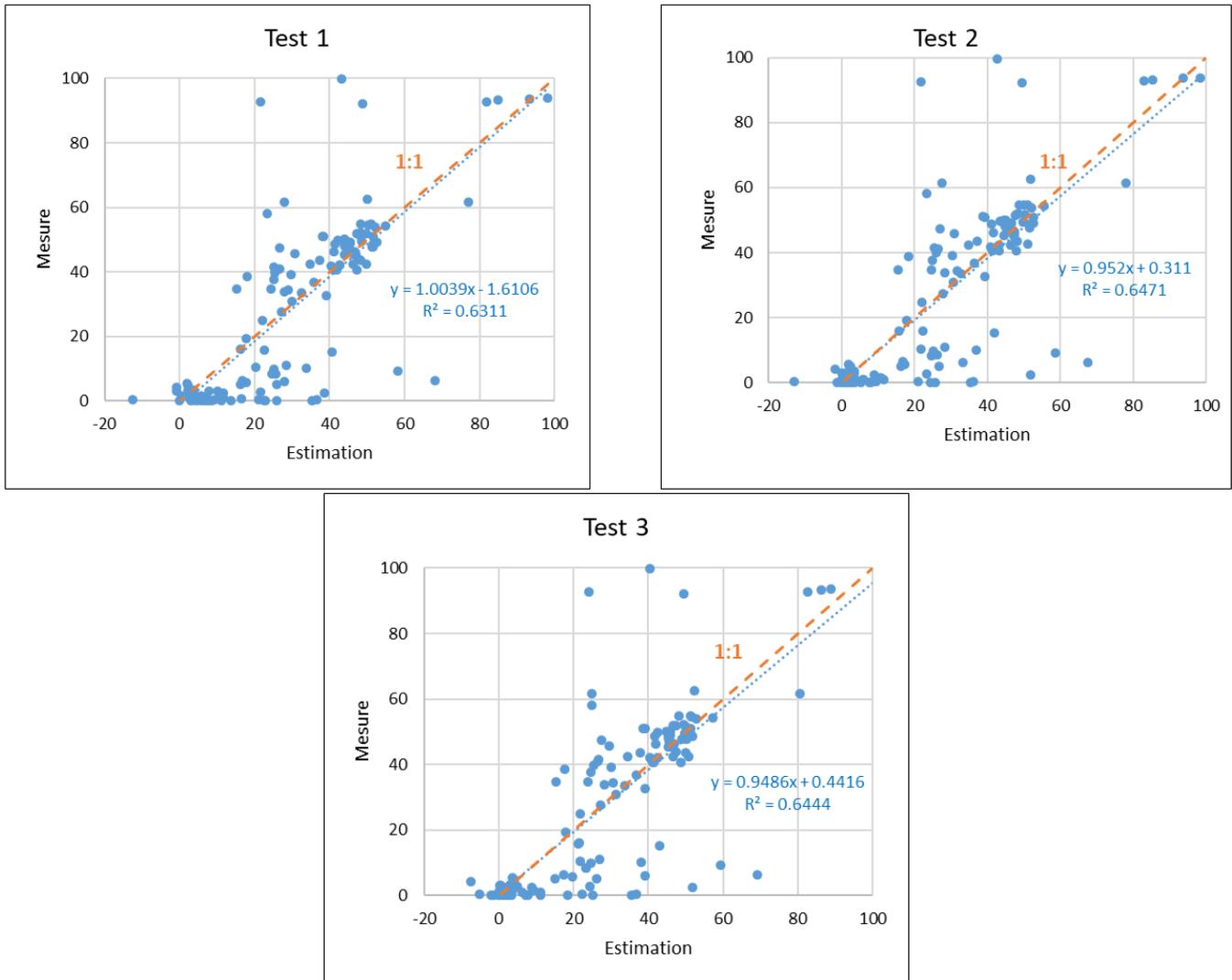


Figure A.72 : Nuage de points des mesures en fonction des estimés pour les Tests 1, 2 et 3

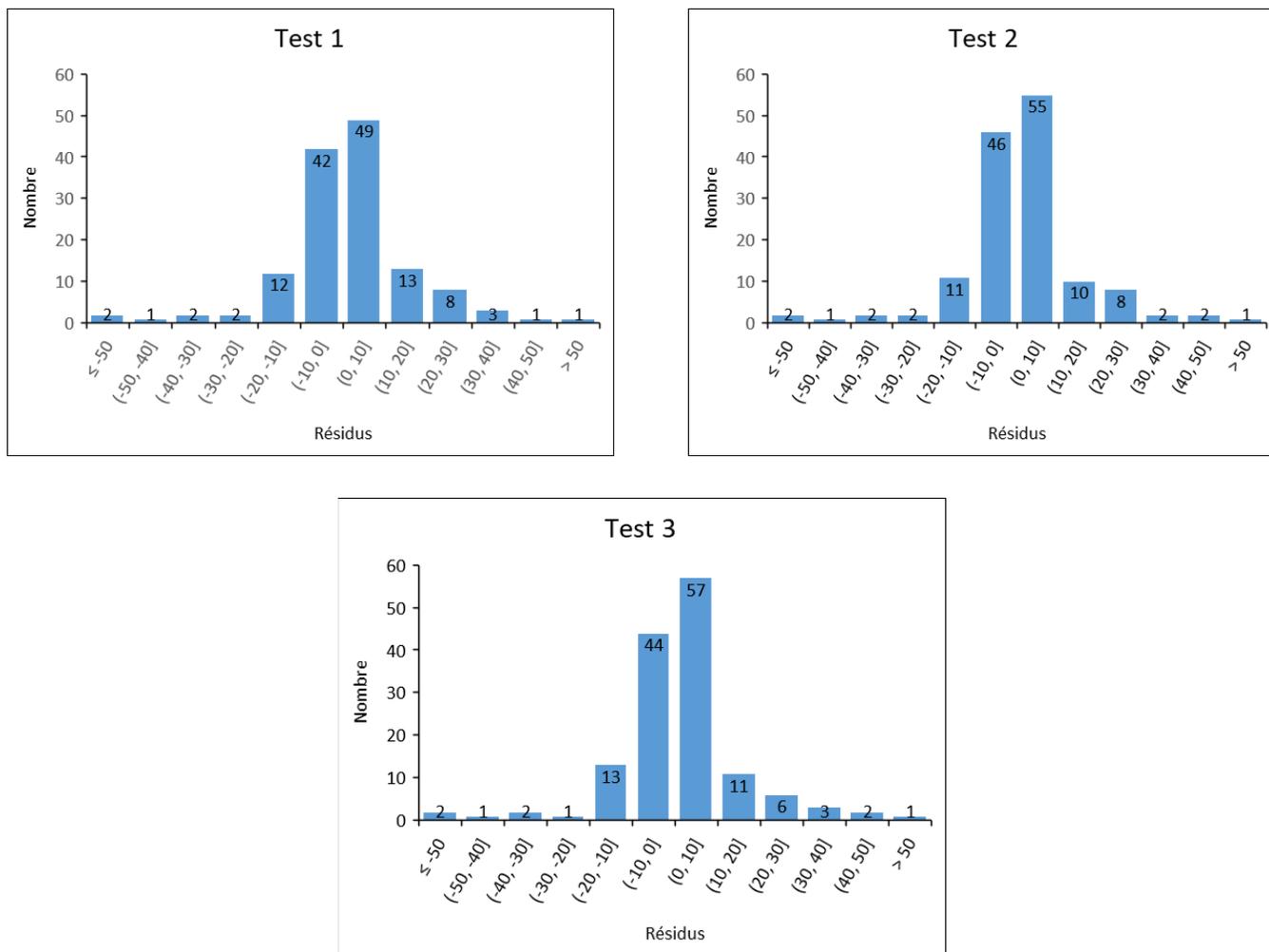


Figure A.73 : Histogrammes des résidus des Tests 1, 2 et 3

**Comparaison des résultats avec des estimations existantes**

Deux estimations de la profondeur et position de la vallée de sédiments de l’île de la Grande Entrée, autres que celle réalisée par la présente étude, ont déjà été publiées. Les Figure A.74 et Figure A.75 comparent respectivement, avec les résultats de la présente étude, l’estimation de l’élévation du socle rocheux du Groupe Madelin’Eau (2009) et les estimations de l’épaisseur des dépôts meubles de Yrro et coll. (2020).

On constate que les forages utilisés sont plus nombreux pour la présente étude que pour le Groupe Madelin’Eau (2009), ce qui améliore sûrement les résultats. La position de la vallée de sédiments est située un peu plus au sud et ses limites sont mieux définies. La topographie de la base de la vallée est aussi plus détaillée.

Bien que Yrro et coll. (2020) ont utilisé les forages compilés dans une version préliminaire de la base de données hydrogéologiques, et pour laquelle le processus de validation présenté ci-dessus n’avait pas été réalisé, la position de la vallée de sédiments est très semblable à celle de la présente étude (Figure A.75). Le niveau de détail de la profondeur de la vallée semble plus élevé pour Yrro et coll. (2020), mais

il est probable que cela soit dû à la méthode d'interpolation. Des « pics » d'épaisseur importante ont dû être corrigés manuellement (F. Yrro, communication personnelle, 2021) et on peut voir une épaisseur exagérée, jusqu'à 116 m, autour de l'observation en forage la plus profonde de 100 m (zone en rouge la plus à l'est sur la Figure A.75).

L'extrémité nord-est de la vallée, tel que représentée par le Groupe Madelin'Eau (2009) (Figure A.74) et Yrro et coll. (2020) (Figure A.75), semble s'étirer vers la mer. Ceci n'est pas observé par l'estimation du portrait. À la lecture des rapports des auteurs précédents, aucune observation n'était disponible dans ce secteur. Yrro et coll. (2020) ont simplement recopié l'estimation du Groupe Madelin'Eau (2009) pour cette zone (F. Yrro, communication personnelle, 2021). L'extension de la vallée vers le nord-est est donc une hypothèse non validée par des observations. Cette hypothèse tire sa source de la carte de la géologie du socle rocheux (Carte 16), qui illustre des « contacts supposés » proposant l'extension de la vallée vers le nord-est (Figure A.76). La récente carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18) montre que les sédiments littoraux et pré-littoraux glacio-marins s'étendent aussi jusqu'à la mer, ce qui appuie l'hypothèse précédente. L'estimation de la présente étude propose qu'à défaut d'être en mesure de vérifier l'étendue et la profondeur de la vallée à cet endroit, il vaut mieux mettre en garde le futur utilisateur d'une imprécision probable que de proposer des valeurs hypothétiques. La visualisation des observations est d'ailleurs une manière pertinente de constater la piètre densité d'observations dans ce secteur.

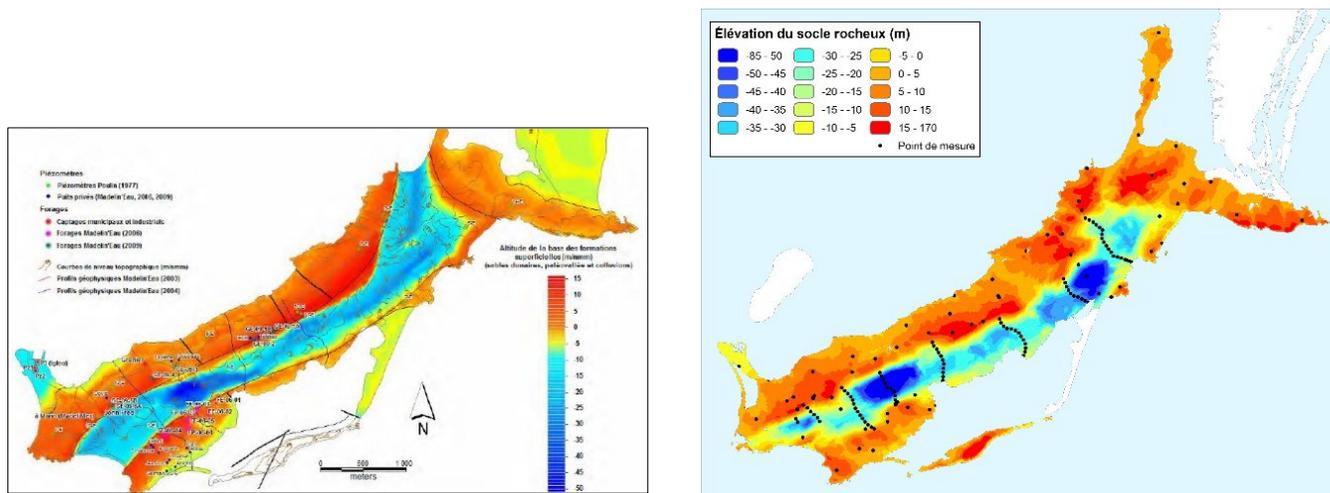


Figure A.74 : Élévation du socle rocheux de l'île de la Grande Entrée estimée par le Groupe Madelin'Eau (2009 – à gauche) et dans le cadre de la présente étude (à droite)

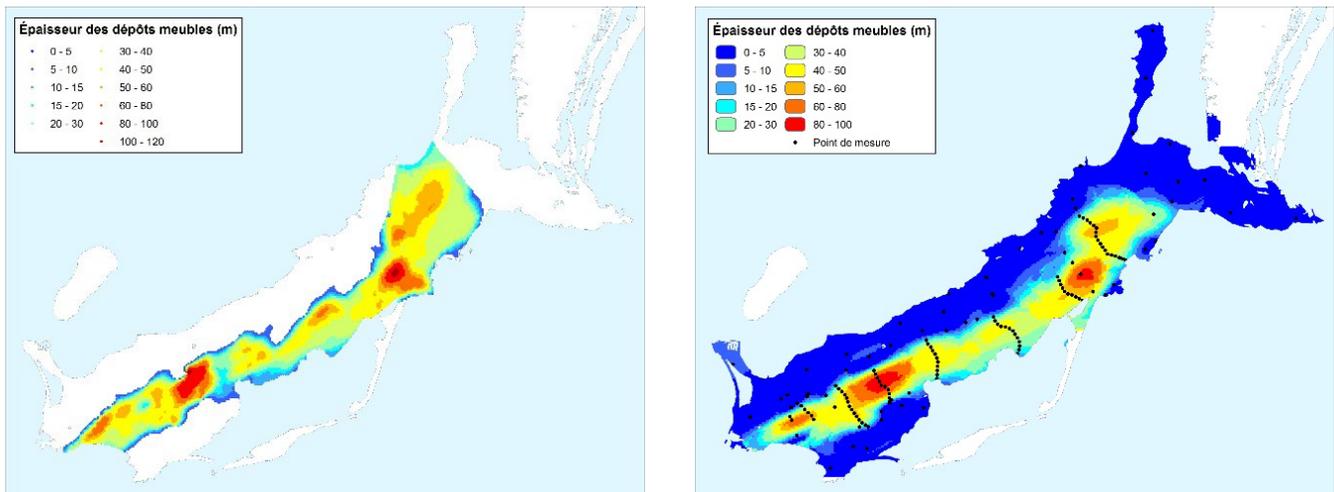


Figure A.75 : Épaisseur des dépôts meubles de l'île de la Grande Entrée estimée par Yrro et coll. (2020 – à gauche) et dans le cadre de la présente étude (à droite)

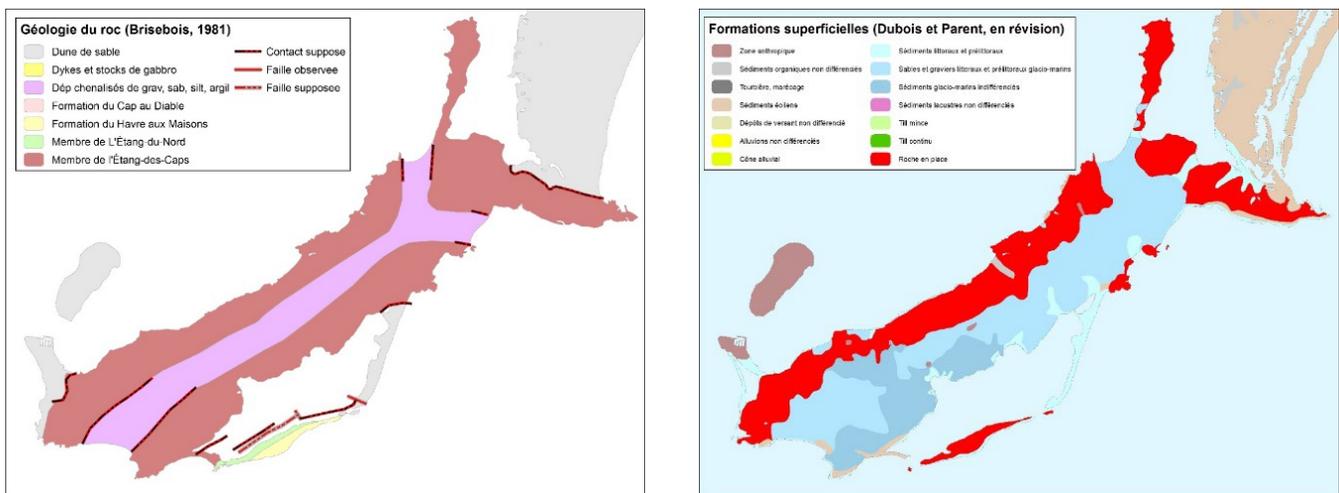


Figure A.76 : Extraits des versions préliminaires des cartes de la géologie du socle rocheux (Carte 16 – à gauche) et de la géologie des formations superficielles (Carte 18 – à droite) pour l'île de la Grande Entrée

## **Annexe 10 : Modélisation pour l'estimation de la recharge avec le programme SWB2**

Préalablement à sa calibration avec le modèle d'écoulement souterrain basé sur le programme MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017) à l'aide des données de piézométrie, la recharge a été estimée à partir du programme SWB (Soil Water Balance), version 2, développée par la Commission géologique des États-Unis (Westenbroek et coll., 2010 et 2018). La mise en place de ce modèle sur les îles de la Madeleine nécessite des intrants climatologiques (précipitations et températures) et des intrants concernant la topographie, la pédologie et l'occupation du sol. Cette annexe présente les hypothèses de modélisation du modèle SWB2, ainsi que le détail de l'acquisition et le traitement des données d'entrée.

Hypothèses de modélisation :

1. Le modèle s'appuie sur un bilan d'eau et considère les processus suivants : d'une part les précipitations liquides ou solides (en entrée) et d'autre part le ruissellement de surface, l'évapotranspiration et la recharge (en sortie). Les ruissellements hypodermiques sont négligés;
2. La recharge est la quantité d'eau infiltrée qui percole verticalement jusqu'à la nappe, c'est-à-dire qui atteint la zone saturée. Elle est calculée après avoir évalué les autres paramètres du bilan d'eau;
3. La recharge est évaluée maille par maille (20 m par 20 m), il n'y a pas de transfert d'eau entre les mailles. Tous les flux latéraux sont négligés;
4. Les eaux de surface comme les lacs ou les mares, lorsqu'ils couvrent la majorité de la maille de 20 m par 20 m, ne sont pas considérés dans le calcul. Il s'agit de zones de résurgences où la recharge est nulle;
5. Le roc fracturé est considéré comme un milieu poreux équivalent et la surface du roc n'est pas une limite à la percolation;
6. Le calcul de l'évapotranspiration repose sur une formulation de Hargreaves and Samani (1985) qui ne prend en compte que les données de température minimale et maximale journalière, et le rayonnement solaire.

En outre, il est à noter qu'il n'y a pas eu d'exercice de calibration n'a été réalisé avec le programme SWB2. En effet, la comparaison avec des débits est impossible aux îles de la Madeleine puisqu'il n'y a que très peu de cours d'eau, et aucune donnée disponible sur leur débit. La recharge est plutôt calibrée dans un deuxième temps, à l'aide du modèle d'écoulements souterrains basé sur MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017).

Si la température de l'air est négative, les précipitations sont considérées comme de la neige. Tant qu'il y a un couvert de neige et pas de fonte, la recharge est nulle. La fonte de la neige est basée sur le calcul suivant : 1,5 mm de neige fond par jour par degré au-dessus de la température 0 °C.

Une option du programme SWB2 permet un routage de surface vers une cellule voisine aval. Si cette option est activée, de l'eau peut ruisseler en surface de l'amont vers l'aval pendant une journée, mais une fois celle-ci terminée, l'ensemble de l'eau encore présente en surface est considéré comme du ruissellement de surface. Le routage de surface n'a pas été utilisé dans le cadre de cette étude, car les lignes d'écoulements de surface se sont révélées très courtes (moins d'une dizaine de mailles dans l'extrême majorité des cas). Le bilan d'eau n'était pas affecté par l'activation de cette option. Il est ainsi plus aisé d'interpréter les résultats sans routage au regard d'autres modèles plus largement employés qui n'intègrent pas non plus d'option de routage comme HELP (Schroeder et coll., 2014) par exemple.

## ***Données d'entrée***

### ***Données climatiques***

Dans le cadre de cette étude, la recharge a été modélisée avec un pas de temps journalier sur une période de 30 ans, entre juillet 1989 et juin 2019. Les données climatiques quotidiennes (précipitations, température journalière maximale et minimale) à cette période sont disponibles aux stations météorologiques Îles de la Madeleine (ID de l'OMM 71710) et Îles de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) (voir Tableau 2.7). Les stations se sont succédé sur cette période, avec une période d'activité commune à partir de 2013. La station Île de la Madeleine A (ID de l'OMM 71709) est celle qui présente le moins de données manquantes, ce sont donc ces données qui ont été utilisées.

### ***Occupation du sol***

L'utilisation du territoire est une donnée fournie par le MELCC pour l'année 2018 à une résolution de 30 m par 30 m (voir la Section 2.4.2). Dans le programme SWB2, plusieurs paramètres sont basés sur la distribution spatiale de l'occupation du sol : le coefficient de ruissellement, la hauteur maximale d'interception et la profondeur racinaire. Les catégories de la couche de données du MELCC ont été simplifiées en regroupant des catégories proches, par exemple « Forêt de conifères dense » et « Forêt mixte dense » ont été fusionnées pour former la catégorie « Boisé dense ». La catégorie « Zone développée » a été découpée en deux niveaux d'urbanisation : « Urbain » pour la zone appartenant au périmètre urbain (MAMH, 2021) et « Résidentiel » pour tout le reste. Le détail de la simplification des catégories est disponible dans le Tableau A.43. La Figure A.77 représente la distribution spatiale de l'occupation du sol utilisé pour le calcul de la recharge.

**Tableau A.42 : Correspondance entre les données de l'utilisation du territoire de 2018 du MELCC, les classes utilisées dans le modèle SWB2 et les coefficients de ruissellements**

Utilisation du territoire			Catégorie simplifiée	Coefficient de ruissellement (%) par groupe hydrologique			
Classe	Description	Aire (km <sup>2</sup> )		A	B	C	D
Forêt de conifères dense	Forestier	11,8	Boisé dense	4	15	29	37
Forêt mixte dense	Forestier	0,2					
Arbuste bas\Marais	Forestier	0,2	Boisé humide	48	55	63	67
Arbuste bas\Marécage	Forestier	0,2					
Arbuste bas\Tourbière minérotrophe	Forestier	0,6					
Arbuste haut\Tourbière minérotrophe	Forestier	<0,1					
Arbuste\Marécage	Forestier	0,2					
Arbuste\Tourbière minérotrophe	Forestier	0,1					
Forêt de conifères clairsemée\Marécage	Forestier	<0,1					
Forêt de conifères clairsemée\Tourbière minérotrophe	Forestier	<0,1					
Forêt de conifères dense\Tourbière minérotrophe	Forestier	<0,1					
Forêt de conifères ouverte\Tourbière ombrotrophe	Forestier	0,1					
Arbuste haut	Forestier	3,6					
Forêt mixte clairsemée	Forestier	<0,1	Boisé peu dense	11	26	43	51
Arbuste	Forestier	39,8					
Coupe forestière	Coupe et régénération	1,5					
Forêt de conifères clairsemée	Forestier	2,4					
Forêt de conifères ouverte	Forestier	7,2					
Forêt mixte ouverte	Forestier	0,2					
Ligne de transmission ou de transport d'énergie	Anthropique	2,3					
Perturbation naturelle	Coupe et régénération	0,4					
Agriculture indifférenciée	Agricole	13,0					
Blé	Agricole	<0,1					

**Tableau A.42 : Correspondance entre les données de l'utilisation du territoire de 2018 du MELCC, les classes utilisées dans le modèle SWB2 et les coefficients de ruissellements (suite)**

Utilisation du territoire			Catégorie simplifiée	Coefficient de ruissellement (%) par groupe hydrologique			
Classe	Description	Aire (km <sup>2</sup> )		A	B	C	D
Cours d'eau	Aquatique	1,4	Eau	Exclu de la modélisation			
Eau	Aquatique	1,6					
Eau salée	Aquatique	-					
Lac	Aquatique	4,9					
Mare	Aquatique	0,5					
Zone industrielle et commerce	Anthropique	<0,1	Industriel léger	50	60	70	80
Zone développée	Anthropique	31,8	Résidentiel (maisons détachées)	30	35	40	50
Bassin de filtration, de décontamination, de déchets liquides, etc.	Anthropique	<0,1	Milieu humide	89	90	91	92
Marais	Humide	6,8					
Marécage	Humide	1,4					
Tourbière minérotrophe	Humide	10,7					
Tourbière ombrotrophe	Humide	1,5					
Golf	Anthropique	0,2	Parcs, Cimetière	10	15	20	25
Culture pérenne et pâturage	Agricole	0,7	Pâturage	10	25	43	51
Route ou chemin	Anthropique	2,3	Pavage	70	80	90	95
Carrière ou gravière	Anthropique	2,8	Sol nu / roc nu	5	30	50	70
Sol nu, roc-sol à nu, sol dénudé ou semi-dénudé sec	Sol nu et lande	40,7					
Périmètre urbain		2,2	Urbain	70	80	90	85

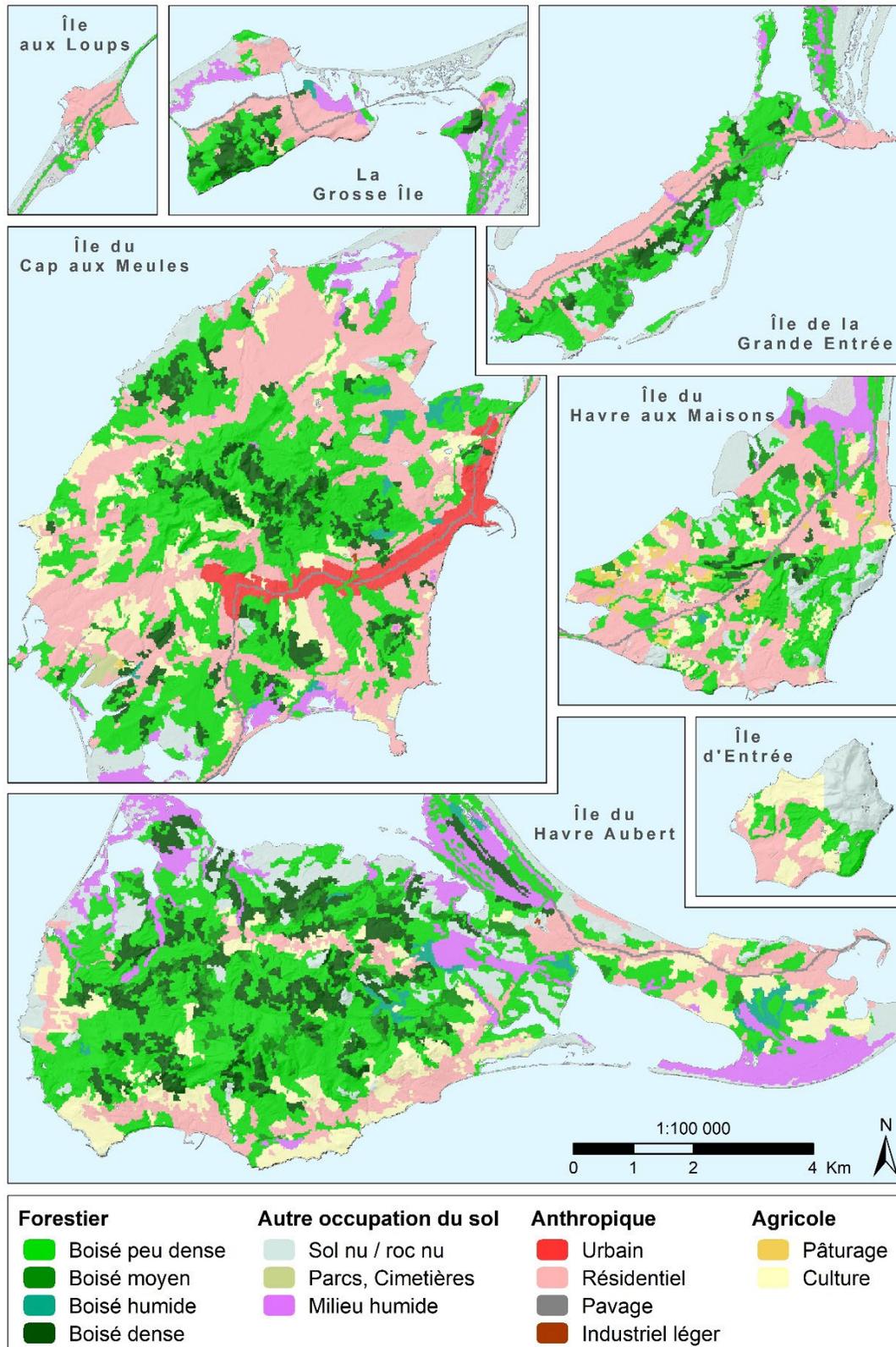


Figure A.77 : Carte de l'occupation du sol intégrée dans le modèle SWB2

### **Groupes hydrologiques**

Les groupes hydrologiques sont un classement des sols naturels qui indique leur susceptibilité à produire du ruissellement en réponse aux précipitations (Gagné et coll., 2013). Dans le cadre de la modélisation de la recharge, le groupe hydrologique et l'occupation du sol permettent de définir le coefficient de ruissellement. Les sols sont classés en quatre groupes de « A » à « D », les sols de type A étant ceux les plus favorables à l'infiltration, et les sols de type D les plus favorables à la génération de ruissellement.

Les données sur la pédologie aux îles de la Madeleine sont toutes basées sur les travaux de Tardif (1967) (voir Section 2.3.6). Les groupes hydrologiques ont été déterminés en fonction des classes de drainage des sols. Celles-ci sont fournies pour chaque série de sol par Gagné et coll. (2013) (Tableau A.43). La classe de drainage se base sur de la photo-interprétation et l'analyse d'observations terrain (notamment la couleur du sol). L'association d'une classe de drainage à un groupe hydrologique, ainsi que la carte des groupes hydrologiques qui en résulte a été discuté avec un expert du territoire, agronome du MAPAQ, et est conforme à ses connaissances de la pédologie des îles de la Madeleine (R. Robitaille, communication personnelle, 2021). Sur chaque zone, plusieurs séries de sols peuvent cohabiter. La Section 2.3.6 présente la méthodologie employée pour obtenir la classe de drainage dans de tels cas. Finalement, la Figure A.78 présente la répartition spatiale des groupes hydrologiques intégrés dans le modèle du territoire basé sur le programme SWB2.

**Tableau A.43 : Groupe hydrologique associé à chaque série de sol des îles de la Madeleine en fonction de sa classe de drainage (d'après Gagné et coll. (2013))**

<b>Classe de drainage</b>	<b>Série de sol</b>	<b>Groupe hydrologique</b>
<b>Très rapidement drainé</b>	Dunes	A
<b>Rapidement drainé</b>	Les Demoiselles	B
<b>Bien drainé</b>	Aurigny, le Bassin, Anse-à-la-Cabane, Île d'Entrée, Fatima, Grosse Île, Lavernière, Madelinot, Havre-aux-Maisons, Solomon	
<b>Modérément bien drainé</b>	Belle-Anse, Coffin, Havre-Aubert, Pointe-Basse, Vigneault, Gros-Cap, Millerand	C
<b>Imparfaitement bien drainé</b>	Corfu, Savane, Grand-Ruisseau	
<b>Mal drainé</b>	Étang-du-Nord, Terres-noires et tourbes	D
<b>Très mal drainé</b>	-	

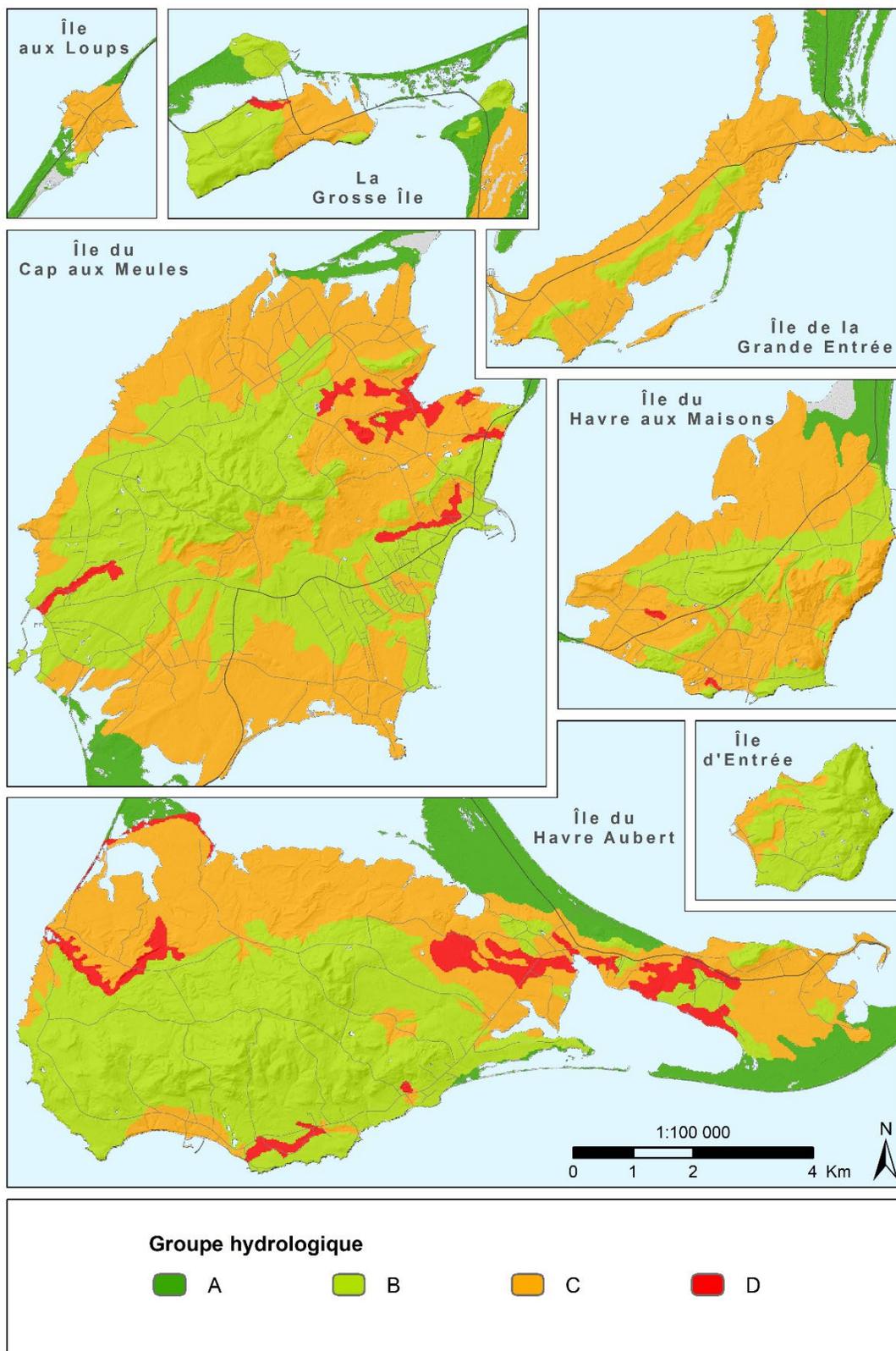


Figure A.78 : Groupes hydrologiques intégrés dans le modèle SWB2

### ***Coefficient de ruissellement***

Le coefficient de ruissellement est un paramètre historiquement utilisé dans la prévision des débits de crue. Il s'exprime en pourcentage et indique la part de ruissellement de surface sur un territoire lors d'une pluie. Comme c'est un paramètre difficilement mesurable, il existe plusieurs méthodes pour l'estimer. Dans cette étude, on s'appuie sur l'occupation du sol et le groupe hydrologique pour le déterminer (Tableau A.43), en se basant sur les tables du Guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP, 2012) qui décrivent les gammes de valeur pour les milieux urbains (ASCE/WEF, 1992) et les territoires ruraux (MTQ, 1995). La Figure A.79 illustre la répartition du coefficient de ruissellement sur le territoire. La catégorie d'occupation du sol « Boisé humide » regroupe toutes les utilisations du sol hybrides décrites par le MELCC (2018) (ex. : « Arbuste bas/Marécage », « Forêt de conifères dense/tourbière minérotrophe », etc.). Les coefficients de ruissellement pour ces zones ont été obtenus en moyennant ceux de la catégorie « Boisé moyen » et « Milieu humide ». Les coefficients de ruissellement pour la catégorie « Sol nu / roc nu » ont été fixés de la façon suivante : le groupe hydrologique de type A représente essentiellement les dunes, ainsi un coefficient de ruissellement très faible a été choisi (5 %). Pour les zones « Sols nu / roc nu » de groupe hydrologique B et C, les coefficients retenus respectifs de 30 % et 50 % ont été choisis en considérant que ces terrains pourraient s'apparenter à du roc affleurant : les dépôts chenalisés et le grès (membre de l'Étang-du-Nord et de l'Étang-des-Caps) d'une part, et les formations du Cap au Diable et de Havre-aux-Maisons d'autre part. Pour les zones « Sols nu / roc nu » de groupe hydrologique D (tourbe et matière organique), un coefficient de ruissellement de 70 % a été fixé.

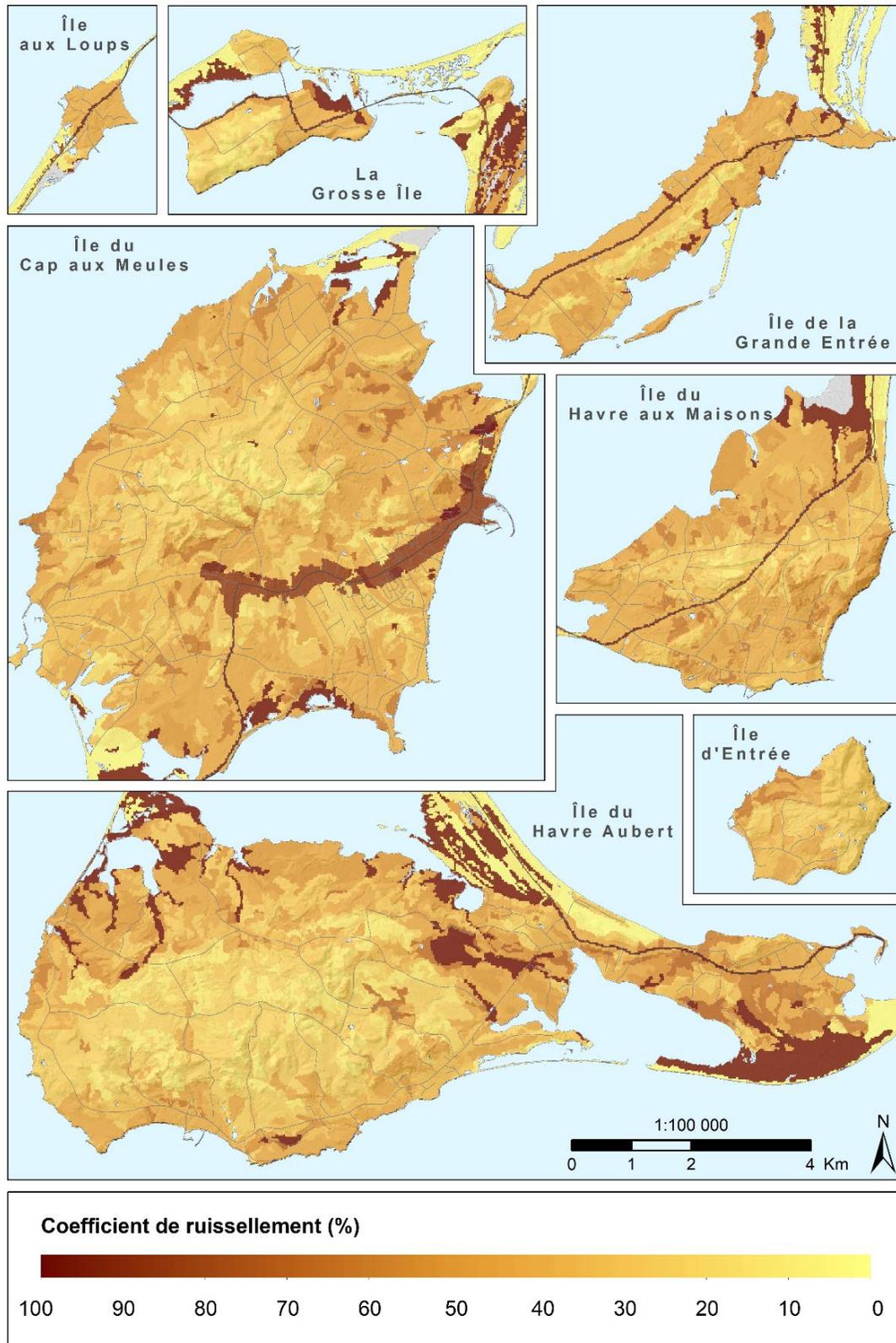


Figure A.79 : Coefficients de ruissellement intégrés dans le modèle SWB2

### **Profondeur racinaire**

La profondeur racinaire joue un rôle dans le calcul de la transpiration végétale. Dans le programme SWB2, plus les racines sont profondes, plus la quantité d'eau captée par les plantes peut être élevée. Les valeurs choisies pour cette étude sont regroupées dans le Tableau A.44. Celui-ci s'appuie en grande partie sur la recherche bibliographique établie dans le cadre du PACES de la Communauté Métropolitaine de Québec (Talbot Poulin et coll., 2013). Seule la profondeur racinaire en milieu humide diffère puisqu'aux îles de la Madeleine, la catégorie d'occupation du sol « milieu humide » dans le modèle de recharge représente des marais, marécages et tourbière (Tableau A4.2) avec une végétation assez limitée. La période de croissance fixée est celle considérée par Agrométéo (2021) pour l'est de la Gaspésie : du 10 mai au 30 octobre. La Figure A.80 présente spatialement la distribution de la profondeur de la zone racinaire.

**Tableau A.44 : Profondeur racinaire et hauteur d'interception maximale pour les différents groupes d'occupation du sol**

Classe	Profondeur de la zone racinaire		Hauteur d'interception maximale en saison de croissance végétale	
	Valeur (m)	Source	Valeur (mm)	Source
<b>Boisé dense</b> <b>Boisé humide</b> <b>Boisé moyen</b> <b>Boisé peu dense</b>	3,3	Canadell et coll. (1996) Finch (1998) Croteau (2006)	2,5	Westenbroek et coll. (2010)
<b>Culture</b> <b>Parc et Cimetière</b> <b>Pâturage</b>	2,0	Croteau (2006) Arnold et coll. (2011) Talbot Poulin et coll. (2013)	1,3	
<b>Milieu humide</b> <b>Industriel léger</b> <b>Résidentiel</b> <b>Urbain</b>	0,2	Arnold et coll. (2011) Croteau (2006)	0,5	
<b>Pavage</b> <b>Sol nu / roc nu</b>	0	Croteau (2006)	0	

### **Hauteur maximale d'interception**

La hauteur maximale d'interception est la quantité d'eau qui peut être stockée sur la canopée lors de précipitations. Le Tableau A.44 présente les valeurs choisies, qui se basent sur la documentation du modèle SWB2. Les secteurs boisés présentent la hauteur d'interception la plus élevée. Le stockage d'eau sur la canopée est représenté par un réservoir, celui-ci est défini par une hauteur. Par exemple sur les terrains boisés ce réservoir est de 2,5 mm, donc si une pluie de 2 mm tombe, aucune eau n'atteindra le sol. En revanche, le réservoir sera quasiment plein et ne pourra plus retenir que 0,5 mm de pluie, et ce jusqu'à ce que l'eau du réservoir s'évapore. La Figure A.80 présente spatialement la distribution de la hauteur maximale d'interception.

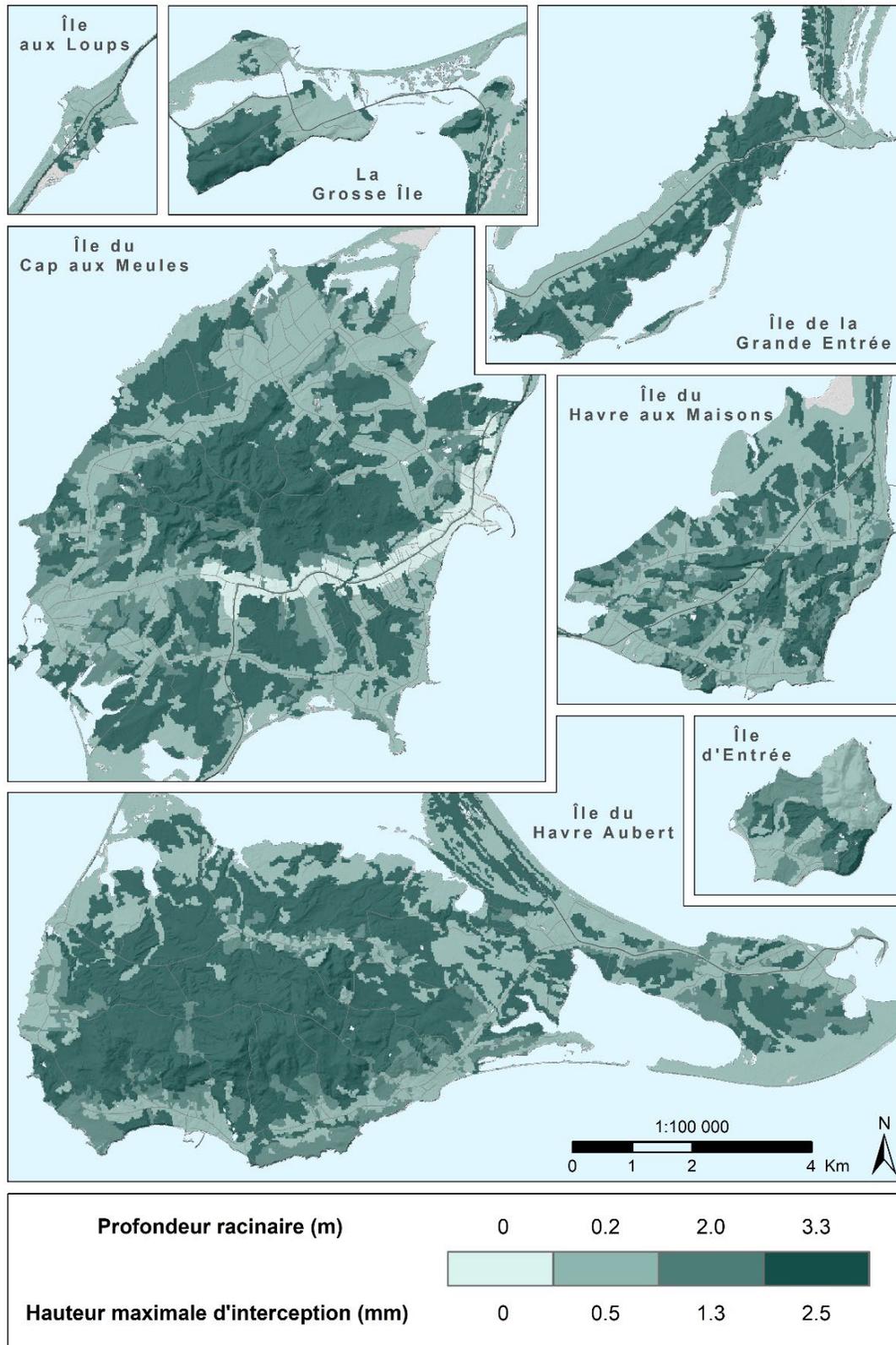


Figure A.80 : Profondeurs racinaires et des hauteurs maximales d'interception intégrées dans le modèle SWB2

### **Capacité d'eau disponible pour les plantes**

La quantité d'eau d'un sol disponible est la quantité qui pourra être extraite par les plantes après drainage gravitaire. Il s'agit de la différence entre la teneur en eau après drainage et le point de flétrissement (seuil d'humidité au-dessous duquel l'eau ne pourra plus être extraite du sol par les plantes). La capacité d'eau disponible dépend de plusieurs paramètres (ex. : la part de matière organique contenue dans le sol, la texture, la structure du sol), mais dans le programme SWB2, elle est simplifiée et déterminée par la texture du sol exclusivement. Par exemple, un sol sableux a une porosité de drainage élevée par rapport à sa porosité totale. Sa capacité d'eau disponible est donc inférieure à celle de sols plus argileux ou organiques dont la porosité de drainage ne représente qu'une petite partie de la porosité totale. La documentation du modèle SWB2 (Westenbroek et coll., 2010) fournit des valeurs de capacité d'eau disponible pour les plantes en fonction de la texture du sol (Tableau A.45). La Figure A.81 représente la distribution spatiale de la capacité d'eau disponible.

**Tableau A.45 : Capacité d'eau disponible pour les textures de sol présents aux îles de la Madeleine**

<b>Texture du sol (Tardif, 1967)</b>	<b>Capacité d'eau disponible (m/m)</b>
<b>Sable</b>	0,10
<b>Sable limoneux</b>	0,12
<b>Limon sableux</b>	0,13
<b>Sable limono-argileux</b>	0,23
<b>Argile/Tourbe</b>	0,27

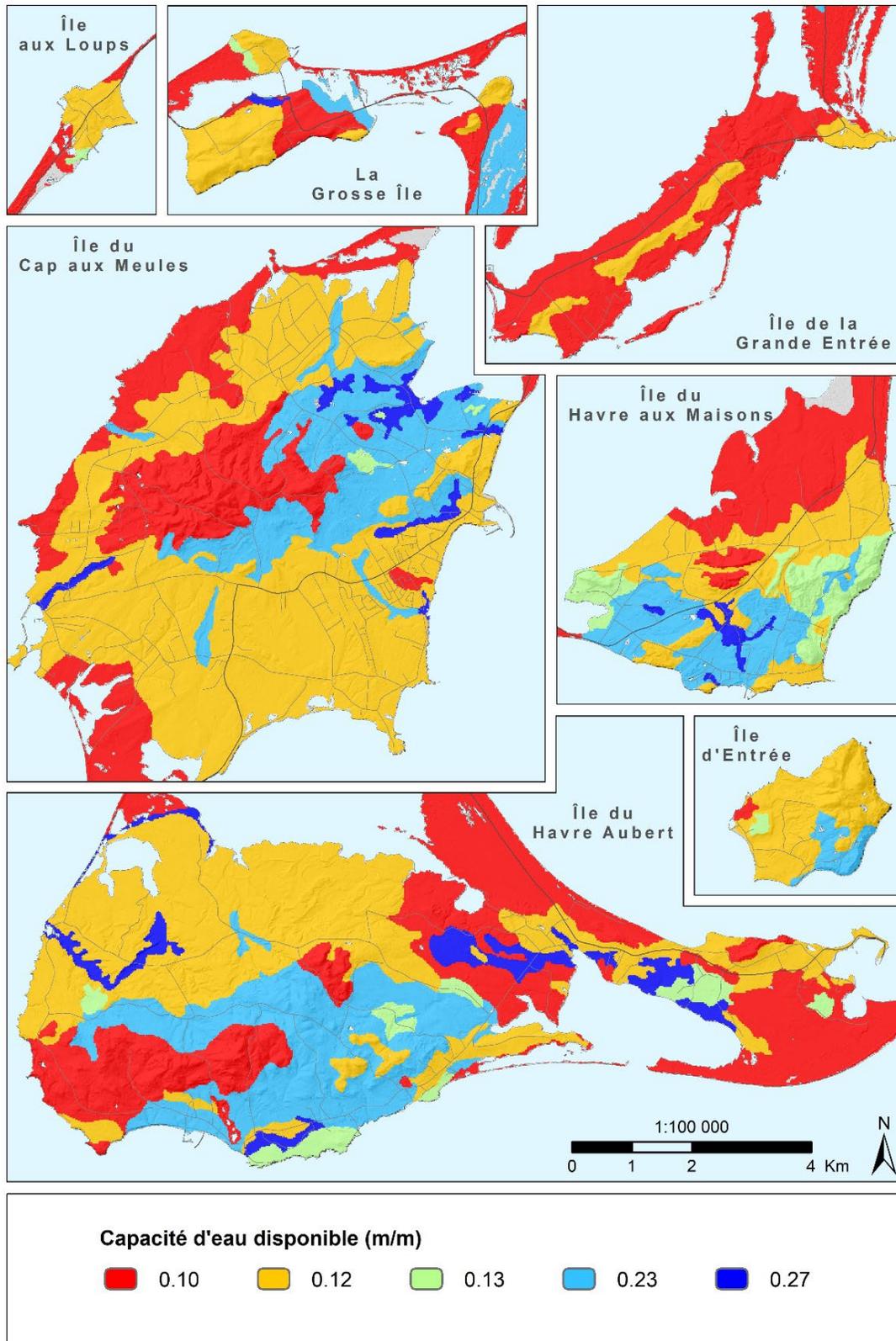


Figure A.81 : Capacités d'eau disponibles intégrées dans le modèle SWB2

## ***Retour critique sur les résultats du modèle de recharge basé sur le programme SWB2***

### ***Comparaison de la recharge modélisée à des chroniques de piézométrie observée***

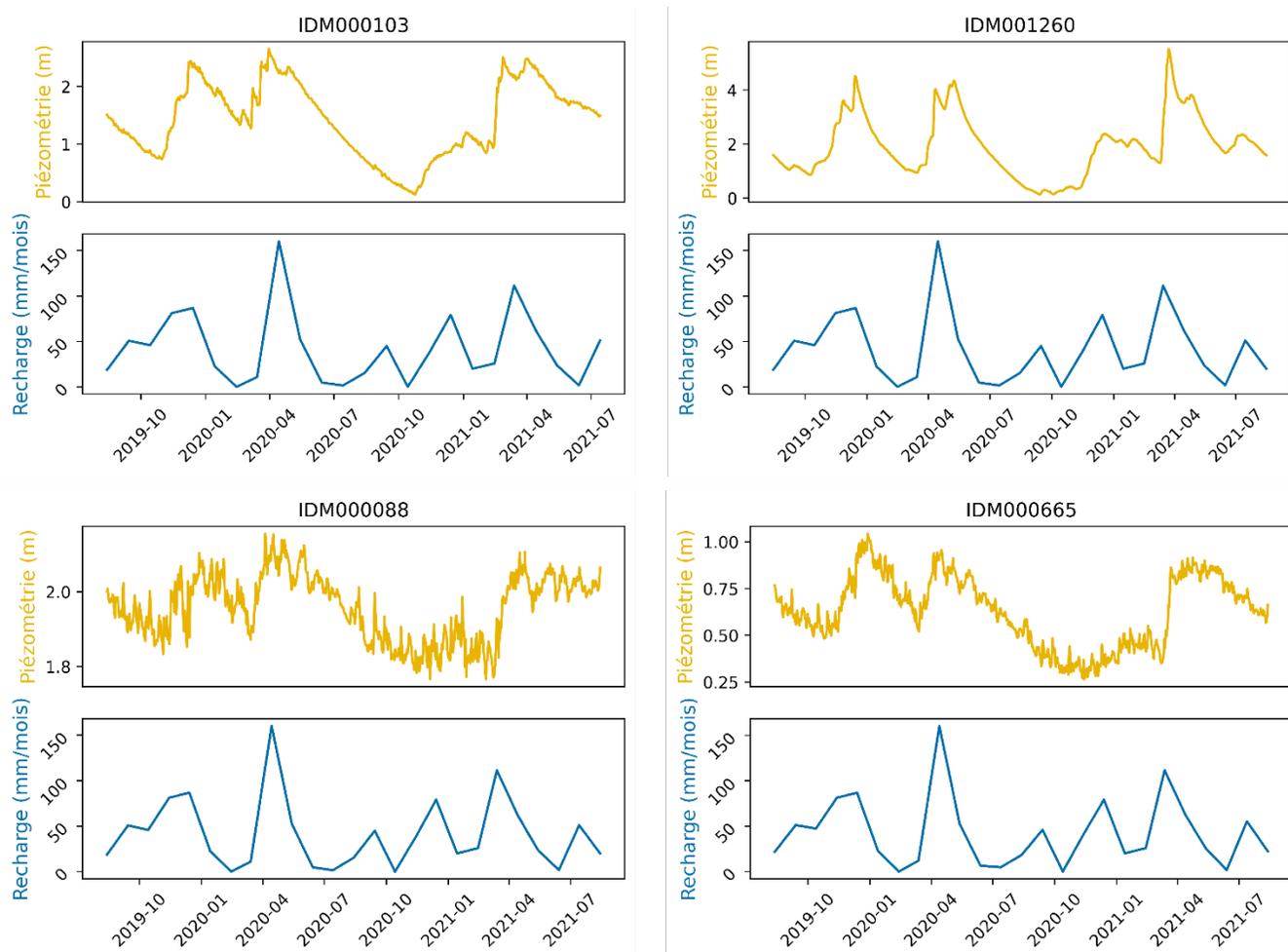
L'évaluation du modèle peut être menée de façon qualitative par la comparaison de la dynamique temporelle de la recharge avec des chroniques de niveau piézométriques (Figure 8.17). Par exemple, les puits IDM00088 et IDM000103 (île du Havre aux Maisons), IDM000665 (Grosse-Île) et IDM001260 (île du Cap aux Meules) sont considérés comme non influencés et on dispose de chroniques de piézométrie entre 2019 et 2021 (voir Figure 8.10, Figure 8.11, Figure 8.12 et Section 8.4.1).

Les profils de recharge pour les quatre puits sont très semblables (Figure A.82). Cela s'explique principalement par le fait que les précipitations sont appliquées de manière uniforme sur l'ensemble des îles, et qu'ils sont tous les quatre localisés dans des contextes semblables (classe hydrologique de sol B, secteur résidentiel ou boisé peu dense). La recharge automnale de 2019 est bien visible sur les chroniques de piézométrie et les sorties de modèle SWB2. Elle commence plus tôt dans les résultats du modèle, ce qui peut s'expliquer par le fait que dans SWB2, les transferts dans la zone insaturée sont négligés. Par contre, les résultats du modèle montrent qu'elle est environ deux fois moins importante que la recharge printanière de 2020 (environ 80 mm/mois à l'automne pour 150 mm/mois au printemps), alors que les remontées de nappe observées sont environ égales pour les deux périodes. Dans le modèle, le pic de recharge printanier est intense, mais bref (1 ou 2 mois). Dans les chroniques de piézométrie observée, le signal de recharge printanier dure quelques mois. L'année suivante, dans les observations, la recharge automnale de 2020 est moins importante que la recharge du printemps 2021, tandis que dans le modèle, les deux épisodes de recharges sont assez proches en termes d'intensité (entre 70 et 100 mm/mois).

Globalement, on constate donc une bonne correspondance entre les chroniques de piézométrie et les résultats de modélisation. Les différences en termes de dynamiques et d'intensité des épisodes peuvent être expliquées par les hypothèses posées par le modèle SWB2, notamment le fait que les transferts en milieu insaturé ne soient pas représentés.

### ***Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur les résultats***

Les paramètres utilisés en intrant du modèle basé sur SWB2 portent une certaine incertitude, liée à leur mesure ou à l'origine des données. La capacité d'eau disponible pour les plantes en particulier, provient de la documentation SWB2 (Westenbroek et coll., 2010). Deux simulations tests ont été menées avec des variations de  $\pm 50\%$  de la valeur initiale pour tous les groupes de sol. Le partage de l'eau entre la recharge et l'interception en est modifié, à hauteur de 20 % au maximum, une variation non négligeable. Ces essais soulignent le besoin d'une boucle de calibration sur les données de recharge et appuient le choix méthodologique d'utiliser le modèle MODFLOW pour calibrer la recharge obtenue avec le modèle basé sur SWB2.



**Figure A.82 : Comparaison des dynamiques de nappe (en orange) et de la recharge modélisée (en bleu) pour chacun des quatre piézomètres non influencés**

**Annexe 11 : Modélisation des écoulements souterrains avec le programme MODFLOW-2005 associé au module SWI2**

Les écoulements souterrains sur les îles de la Madeleine ont été modélisés en se basant sur le programme MODFLOW-2005 (Harbaugh et coll., 2017), avec le module d'intrusion saline SWI2 (Bakker et coll., 2013). La méthodologie générale de la modélisation, ainsi que la justification du choix des modèles sont décrites à la Section 7. Dans cette annexe se trouve d'abord une explication du fonctionnement du programme MODFLOW-2005 et du module SWI2. Ceci est suivi d'une description des intrants au modèle. Ensuite la démarche de la calibration est détaillée, il s'agit d'une étape essentielle qui permet de s'assurer d'une représentation correcte de la réalité.

## ***Le programme MODFLOW-2005 et les modules spécifiques utilisés***

### ***Programme MODFLOW-2005***

La suite MODFLOW développée par l'USGS est largement utilisée dans la modélisation des écoulements souterrains à l'échelle régionale. MODFLOW s'appuie sur la loi de Darcy pour simuler les écoulements d'eau dans un milieu (Harbaugh et coll., 2017). Combinée au principe de conservation de la masse sur un petit volume, l'équation aux dérivées partielles décrivant la distribution de la charge hydraulique dans l'espace et le temps résolue par MODFLOW en conditions saturées s'écrit de la façon suivante (Anderson et coll., 2015) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (4)$$

Avec  $K_x$ ,  $K_y$ , (L/T) les conductivités hydrauliques dans les directions  $x$  et  $y$ ,  $h$  (L) la charge hydraulique,  $R$  (L.T<sup>-1</sup>) la recharge,  $S_y$  (-) le coefficient d'emmagasinement du matériel poreux et  $t$  (T) le temps. Cette équation, associée aux conditions initiales de charge et à des conditions aux limites de flux ou de charge, compose une représentation mathématique des écoulements souterrains. La résolution numérique de ce système est basée sur la méthode des différences finies et s'appuie sur un maillage rectangulaire. Dans la version MODFLOW-2005, présentement utilisée, le maillage est obligatoirement régulier. Pour les simulations en régime permanent, l'équation résolue par le modèle spécifie que la somme des entrées et des sorties de chaque maille doit être nulle.

### ***Module SWI2***

Le module SWI2 (Bakker et coll., 2013) a été développé en 2013 sur la version MODFLOW-2005, la plus récente à l'époque. Le module permet de simuler la répartition verticale de masses d'eau à densité variable. SWI2 pose l'hypothèse d'une interface abrupte en négligeant les processus de dispersion. Ceci présente un avantage majeur par rapport aux programmes résolvant les équations de transport (advection et dispersion) en termes de temps de calcul. La position de l'interface eau douce – eau salée est calculée par le module SWI2 et s'appuie sur les solveurs de MODFLOW-2005, mais intervient dans un second temps, après la résolution des écoulements souterrains. L'effet des différences de densité de l'eau est pris en compte dans la composante verticale de la loi de Darcy.

### ***Module MNW2***

Comme le maillage est obligatoirement régulier (spécification de la version MODFLOW-2005), il n'est pas possible de raffiner la discrétisation spatiale autour des puits. Ainsi lorsqu'un pompage est imposé dans une maille, le rabattement induit très sous-estimé. Le module MNW2 (Konikow et coll., 2009) est utilisé pour corriger le rabattement aux puits. La correction s'appuie sur la formulation de Thiem (1906) pour estimer le rabattement à partir du rayon du puits, de la charge hydraulique dans la maille, et de la

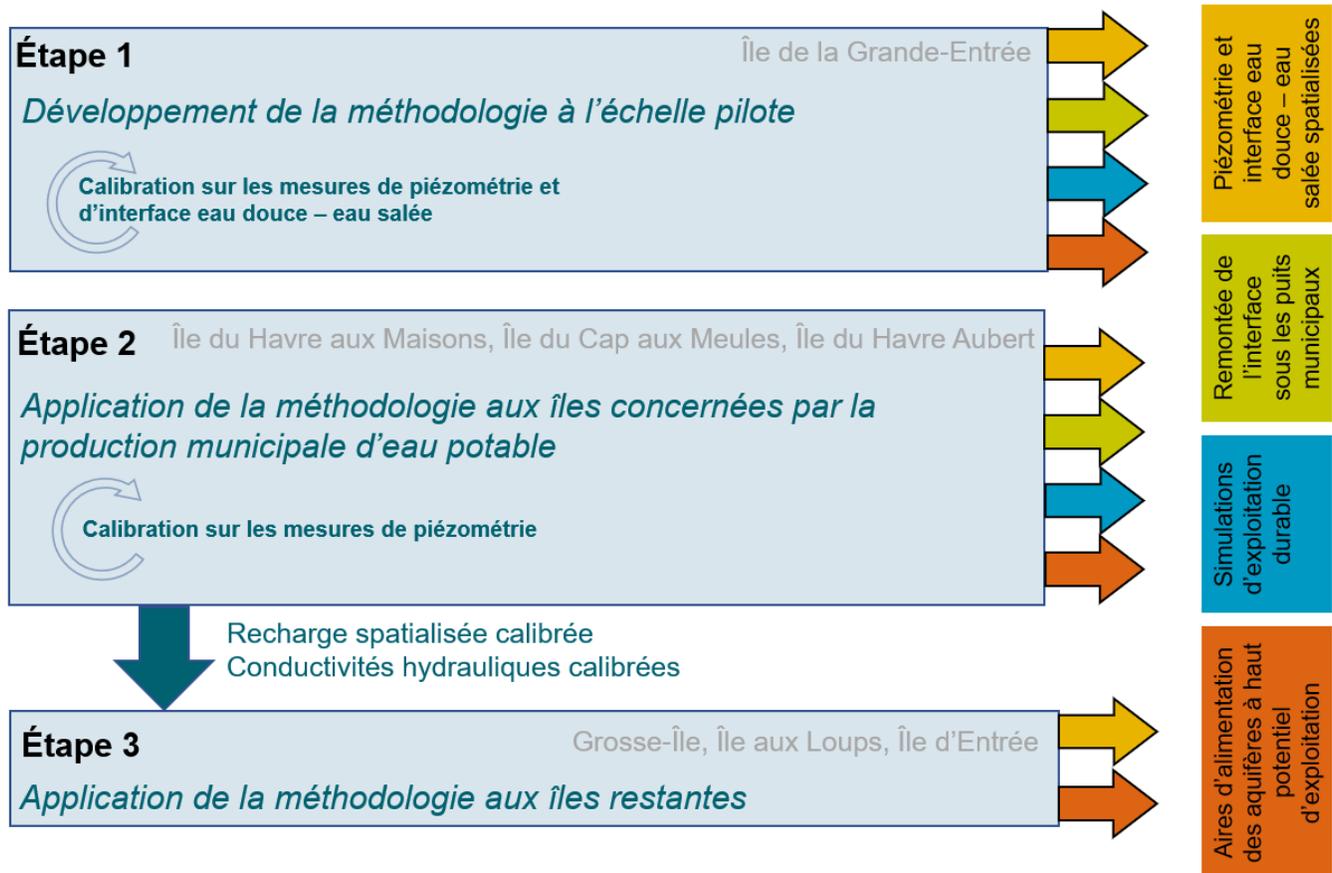
transmissivité de l'aquifère (déduite de la profondeur du puits et de la conductivité hydraulique de l'unité géologique dans laquelle se trouve le puits).

### ***Module MODPATH***

MODPATH (Pollock et coll., 2017) est un module de traçage de particules. Il permet de mimer le suivi temporel et spatial d'une molécule fictive se déplaçant au même rythme que l'eau (pas de dégradation, pas de réaction avec les particules de sol) vers son point de sortie (mode « forward ») ou vers son point d'entrée (mode « backward ») à partir des champs de vitesse obtenus dans la solution en régime permanent des modèles d'écoulement souterrains. On peut ainsi tracer des lignes d'écoulement, et visualiser le chemin des particules depuis leur recharge dans la nappe vers leur sortie en résurgence en mer ou sur terre, ou leur pompage.

### ***Description des modèles des îles***

La méthodologie de modélisation des écoulements souterrains a été développée à partir de l'échelle pilote de l'île de la Grande Entrée (Figure A.83) et a été l'objet d'une publication (Coulon et coll., 2021). Dans un second temps, les modèles des autres îles concernés par la production d'eau potable sont construits (île du Havre aux maisons, île du Cap aux Meules, et île du Havre Aubert). La calibration des paramètres de conductivité hydraulique et de recharge spatialisée (issue du modèle de recharge basé sur le programme SWB2) sur les mesures de piézométrie permet d'alimenter les modèles des îles restantes (Grosse-Île, île aux Loups et île d'Entrée). Chaque modèle d'île produit des résultats de piézométrie spatialisée et d'interface eau douce – eau salée spatialisée. Le traçage de particules sur l'ensemble des îles permet de déterminer des aires d'alimentation des aquifères à haut potentiel d'exploitation (section 9.1.3). Pour les quatre îles sur lesquels se trouvent des puits d'alimentation municipaux, une évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux (section 9.1.2), ainsi que des simulations d'exploitation durables sont produites (voir Annexe 12).



**Figure A.83 : Méthodologie de la construction des modèles d'écoulements souterrains sur le territoire d'étude**

Les hypothèses de modélisations des modèles développés sur les îles sont décrites à la Section 7.3. Le maillage se compose de cellules rectangulaires de 20 m par 20 m sur les axes horizontaux, et d'une unique couche sur l'axe vertical (Figure A.84). Le plancher océanique ainsi que les limites verticales des modèles sont représentés par un flux nul. Le flux de recharge est appliqué à la surface des mailles terrestres. Les échanges entre la mer et l'eau sont imposés par une condition limite à flux dépendant de la charge. Une condition de drain est appliquée sur la surface et vise à reproduire une surface de suintement (option non disponible sur MODFLOW-2005) représentant les résurgences. Si la nappe est plus élevée que la surface du sol, de l'eau sort du système.

La calibration du modèle se déroule en régime permanent. Les débits de pompages municipaux moyens (Section 3.1.3) sont appliqués sur les mailles où se situent des puits. Chaque maille a une dimension de 20 m par 20 m, le module MNW2 est appliqué pour approximer le rabattement effectif.

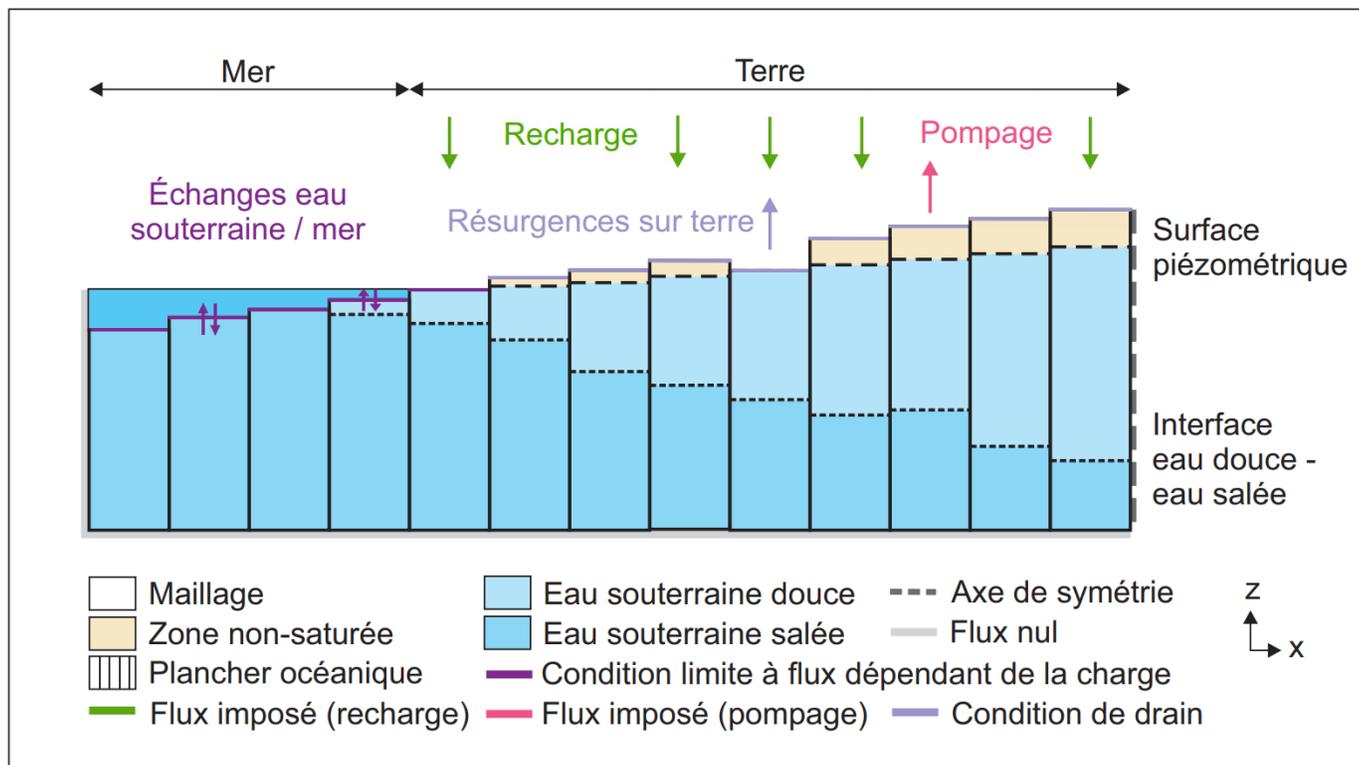


Figure A.84 : Représentation schématique du modèle d'écoulement vu en coupe

### Données d'entrée

#### Délimitation du territoire de chaque modèle

La bordure extérieure de chaque modèle d'île correspond à une zone englobant les terres émergées ainsi qu'une bande de 1 km autour des côtes.

#### Modèle numérique de terrain

Les données d'élévations sont dérivées du relevé LiDAR de 2018 du MERN, et de données de bathymétrie issue de mesures de l'université Laval (Section 2.3.1).

#### Conductivités hydrauliques

Les modèles considèrent une valeur de conductivité hydraulique par unité géologique. Les valeurs sont issues de la compilation des essais de pompage et de diverses analyses granulométriques (Section 8.1.1). La moyenne par unité géologique est la valeur initiale utilisée pour la calibration sur chaque île concernée par la production d'eau potable municipale (Étape 1 et 2 de la Figure A.83 : île de la Grande Entrée, île du Havre aux Maisons, île du Cap aux Meules, île du Havre Aubert). Les bornes de calibration correspondent à deux écarts-types autour de la moyenne. Les valeurs de conductivité hydraulique calibrées sont intégrées aux modèles de Grosse Île, de l'île aux Loups, et de l'île d'Entrée (Étape 3 de la Figure A.83).

#### Recharge

La recharge intégrée au modèle de l'île de Grande Entrée est uniforme sur l'ensemble de l'île. Sur les autres îles concernées par la production municipale d'eau potable, ce sont les résultats du modèle de

recharge basé sur le programme SWB2 qui ont été utilisés (une valeur par maille du modèle d'écoulement), et calibrés (étape 2 de la Figure A.83). La recharge calibrée est intégrée aux modèles de Grosse Île, de l'île aux Loups, et de l'île d'Entrée (étape 3 de la Figure A.83).

### **Localisation, rayon et profondeur des puits**

La localisation, le rayon et la profondeur des puits municipaux sont issus de la base de données hydrogéologique du projet, réunissant l'ensemble des informations disponibles sur le territoire.

### **Débits de pompage municipaux**

Les débits de pompage municipaux ont été compilés à partir de plusieurs sources de données, notamment les données issues du système de télémétrie de la municipalité et les volumes mensuels prélevés déclarés au MELCC (Section 3.1).

### **Dispersivité verticale**

Le module SWI2 simule une interface abrupte, et il a été démontré que ce type de modèle tend à surestimer l'intrusion saline (Dausman et coll., 2010). Un facteur correctif dépendant de la dispersivité verticale, de l'épaisseur de l'aquifère et de la densité de l'eau douce et de l'eau salée est alors appliqué (Pool et coll., 2011). La dispersivité verticale est difficile à caractériser, la valeur choisie se base sur un modèle précédent (Lemieux et coll., 2015) et la littérature (Gelhar et coll., 1992). À noter, en régime permanent ce sont les écoulements parallèles à la surface de la lentille qui dominent (Coulon et coll. 2022, en révision).

### **Conductance du fond marin et des drains en surface**

Les échanges entre l'eau souterraine et la mer sont régulés par une condition limite à flux dépendant de la charge, et les résurgences d'eau en surface par une condition de drain. Une conductance [ $L^2/T$ ] doit être appliquée dans les deux cas. La conductance est égale à une conductivité hydraulique  $K$  appliquée sur une certaine épaisseur  $W$  et sur une surface de maille  $S$  (conductance =  $K*S/W$ ).

Pour les échanges entre l'eau souterraine et la mer, on considère la surface entière de la maille, sur une épaisseur correspondant à la moitié de l'aquifère (soit 150 m pour Grande Entrée, 175 m pour Grosse Île et 250 m pour les autres îles) avec une conductivité hydraulique égale à celle du Membre de l'Étang-des-Caps. La conductance en mer avant calibration est donc égale à  $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (pour une conductivité hydraulique égale à celle du Membre de l'Étang-des-Caps de  $5,95 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ). La valeur de la conductance dans la condition de limite à flux dépendant de la charge n'influence pas le flux total sortant en mer, mais sa répartition spatiale. Plus la conductance est élevée, plus les résurgences en mer sont localisées près des côtes. Plus la conductance est faible, plus les résurgences s'étalent sur une plus grande surface depuis les côtes.

Sur terre, plusieurs cas de figure peuvent cohabiter : dans le cas d'une résurgence due à un relief accidenté (fond des dépressions topographiques, au bas de fortes pentes, ruisseaux), on ne peut pas considérer que la résurgence intervient sur la totalité de la surface de la maille, et au contraire dans des zones marécageuses ou des marais, la résurgence est plus uniformément répartie sur la maille. Plusieurs valeurs de conductance ont été testées pour prendre en compte ces deux cas de résurgence sur terre. La valeur retenue de conductance pour les drains est de  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### ***Piézométrie***

La calibration des modèles se base sur les observations de piézométrie. Une validation a été opérée à partir de l'ensemble des données contenues dans la base de données. Le processus de validation comporte plusieurs étapes, il écarte les observations aberrantes (par exemple : localisation en mer, niveau au-dessus du sol), mais aussi les observations qui ne sont significativement pas cohérentes avec le voisinage. L'Annexe 14 revient en détail sur le processus de validation des données de piézométrie.

### ***Interface eau douce – eau salée***

Il existe trois types de données de profondeur d'interface sur le territoire : mesure directe de la conductivité électrique dans des puits profonds traversant l'interface, mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE), et mesures de TDEM « *Time Domain Electromagnetic Method* » (voir Sections 4.1.3, 4.2.3 et 4.2.5). Les interprétations du niveau de l'interface basé sur les mesures géophysiques ont été considérées dans la calibration du modèle d'écoulement de l'île de la Grande Entrée au même titre que les observations de piézométrie. Sur les autres îles, le niveau de l'interface issu des mesures a été comparé après calibration aux résultats de modélisation.

### ***Porosité de drainage***

La porosité de drainage des différentes unités géologiques est utilisée pour les simulations en régime permanent. En contexte de nappe libre, ce paramètre influence l'évolution du niveau de la nappe dans le temps. En régime transitoire également, elle est également utilisée comme approximation à la porosité cinématique dans le module SWI2 (section 9.1.1). Les valeurs sont présentées dans la section 8.1.2, elles proviennent principalement de la littérature, ainsi que de quelques mesures effectuées dans le Membre de l'Étang-des-Caps.

### ***Emmagasinement spécifique***

L'emmagasinement spécifique est intégré au modèle pour les simulations en régime transitoire. Dans un contexte de nappe captive (sous les cours d'eau par exemple), l'évolution du niveau de la nappe dépend de ce paramètre.

**Tableau A.46 : Source des données utilisées pour construire les modèles d'écoulements souterrains**

<b>Paramètre</b>	<b>Source</b>	<b>Section de référence</b>
Délimitation du territoire de chaque modèle	Dérivé du LiDAR du MFFP de 2018 et bathymétrie (ULaval)	Section 2.1
Élévation	Dérivé du LiDAR du MFFP de 2018 et bathymétrie (ULaval)	Section 2.3.1
Géologie du roc	Brisebois (1981)	Section 5.1.1.2
Conductivités hydrauliques	Base de données hydrogéologique	Section 8.1.1
Recharge	Leblanc (1994) Résultats du modèle de recharge basé sur le programme SWB2	Sections 8.4.3 Annexe 10
Localisation, rayon et profondeur des puits	Base de données hydrogéologique	Section 3.1.1
Débits de pompage municipaux	Données de pompages municipaux de 2002 à 2020. Déclarations par la municipalité au MELCC de 2014 à 2019.	Section 3.1.3
Dispersivité transversale	Lemieux et coll. (2015) Gelhar et coll. (1992)	
Piézométrie	Base de données hydrogéologique Acquisition de données piézométriques ULaval	Sections 4.1.2 et 4.2.6 Annexe 4
Profondeur de l'interface eau douce – eau salée	Mesures géophysiques historiques Acquisition de données géophysiques ULaval	Sections 4.1.3 et 4.2.3
<b>Porosité de drainage</b>	Base de données hydrogéologique et littérature	Sections 8.1.2 et 9.1.1
<b>Emmagasinement spécifique</b>	Base de données hydrogéologique	Sections 8.1.1 et 9.1.1

## **Calibration**

### **Méthodologie de la calibration**

Chaque résultat de modélisation a une incertitude qui peut provenir de différentes sources : par exemple le programme MODFLOW (résolution numérique des équations physiques, conceptualisation de certains processus, couplage des processus) ou le modèle (choix du maillage, hypothèses de simplification, valeur des paramètres, distribution spatiale des paramètres). La quantification de ces incertitudes est délicate, c'est pourquoi la confrontation des résultats de modélisation à des observations terrain est une étape indispensable. La calibration d'un modèle consiste à faire varier des paramètres d'entrée sur un certain intervalle pour que les résultats de modélisation s'approchent le plus possible de variables observées (variable cible). Les paramètres à considérer en priorité dans la calibration sont ceux qui ont une grande incertitude et/ou une grande influence sur les variables cibles.

Les modèles d'écoulements ont été calibrés à l'aide de l'outil de calibration automatique PEST (Doherty, 2004). Les variables cibles sont les observations piézométriques et les mesures de la profondeur d'interface eau douce – eau salée pour l'île de la Grande Entrée et les observations piézométriques seulement pour l'île du Havre aux Maisons, l'île du Cap aux Meules et l'île du Havre Aubert. Une incertitude est attribuée à chaque observation. Moins l'observation est incertaine, plus celle-ci aura de

poids lors de la calibration. L'incertitude de chaque observation piézométrique peut avoir plusieurs sources : la mesure elle-même (par exemple : opérateur, instrument), la temporalité de la mesure (selon le jour de l'année, dans un même puits le niveau de la nappe est différent) et le pompage (est appliqué sur les puits municipaux exclusivement). L'incertitude totale de chaque observation est la racine de la somme de ces trois incertitudes au carré (Coulon et coll., 2021). L'incertitude liée à la mesure est la même pour tous les puits, et évaluée à 0,04 m. L'incertitude liée au pompage pour les puits municipaux est évaluée à 0,5 m. L'incertitude liée à la temporalité de la mesure diminue si plusieurs mesures ont été prises au même puits à différentes dates, la méthode prend en compte le nombre de mesures et leur variabilité (Hughes et Hase, 2010). Au total sur l'ensemble des observations, l'incertitude minimale (puits sans pompage, avec chronique de données disponibles) est de 0,06 m et l'incertitude maximale (puits avec pompage et peu de données disponibles) est de 0,69 m. Les observations piézométriques jugées comme « moins fiables » lors d'étape de validation (Annexe 14) ont été prises en compte dans la calibration, car spatialement, certaines sont localisées dans des zones sur lesquelles il n'y a pas d'autres données. Leur moins grande fiabilité est prise en compte, on leur attribue incertitude de 2 m. Une incertitude de 15 m et 20 m est respectivement associée aux mesures géophysiques de la profondeur de l'interface ERT et TDEM. Cette valeur reflète la confiance que l'on peut attribuer à l'interprétation de ces mesures indirectes (Section 8.3.2).

Les paramètres pris en compte dans la calibration sont les conductivités hydrauliques (une par unité géologique), la recharge et la dispersivité transversale. Les conductivités hydrauliques varient selon une loi lognormale autour de la moyenne. Les écarts-types sont calculés sur l'ensemble des données disponibles dans chaque unité géologique (Tableau A.52). Un intervalle de plus ou moins deux écarts-types autour de la moyenne est choisi. Pour la Formation du Cap au Diable, la Formation du Havre aux Maisons et le Membre de l'Étang-du-Nord, la borne minimale a été légèrement descendue par rapport à la moyenne moins deux écarts-types pour laisser davantage de liberté à l'algorithme de calibration. Ce choix peut se justifier par le nombre relativement réduit de données ayant servi de base aux statistiques (moyenne et écart-type). Lors de la calibration du modèle de l'île de la Grande Entrée, des bornes différentes ont été utilisées. Pour les dépôts chenalisés, la distribution est moins large pour mieux guider l'algorithme de calibration. Pour les roches du Membre de l'Étang des Caps, la méthode des points pilotes a été utilisée (Coulon et coll., 2021) et l'intervalle de variation est plus large. La recharge varie selon une loi gaussienne, l'écart-type est fixé à 150 mm/an pour l'île de la Grande Entrée (étape 1 de la Figure A.83), et  $\pm 20\%$  de sa valeur sur les autres îles sur lesquelles la calibration a lieu (étape 2 de la Figure A.83). La dispersivité verticale varie aussi selon une loi gaussienne, et les bornes de l'intervalle sont issues de la littérature (Gelhar et coll., 1992). L'ensemble des valeurs initiales et des bornes des intervalles de variation sont résumées dans le Tableau A.47.

Lorsqu'une unité géologique n'apparaît pas sur une île, celle-ci n'est pas intégrée à la calibration. Les dépôts chenalisés n'apparaissent pas sur l'île du Cap aux Meules et très marginalement sur l'île du Havre aux Maisons, dans ce cas ils ne sont pas intégrés à la calibration sur ces îles. Sur l'île du Havre Aubert, la présence de l'unité géologique de Dykes et stocks de gabbro est très marginale, les paramètres sur ces zones sont égaux aux paramètres de la Formation du Havre aux Maisons.

Lors de la calibration, l'outil PEST teste différentes combinaisons de paramètres, en optimisant le balayage de leurs intervalles de variation. Le but de l'algorithme de PEST est de minimiser la fonction objectif, qui est la somme de tous les écarts entre les valeurs observées et modélisées, pondérée par le

pois de chaque observation (le poids est égal à l'inverse de son incertitude). Il est important de mentionner que pour diminuer les temps de calcul parfois considérables de la calibration des modèles, les calculs ont été parallélisés sur les serveurs de Calcul Canada.

**Tableau A.47 : Valeurs a priori et bornes minimales et maximales des paramètres calibrés**

Paramètre	Unité géologique	Valeur a priori	Minimum	Maximum
<b>Conductivité hydraulique (m/s)</b>  ( <i>Île de la Grande Entrée</i> )	Formation du Havre aux Maisons	$1,88 \times 10^{-4}$	$5,00 \times 10^{-7}$	$1,71 \times 10^{-2}$
	Formation du Cap au Diable	$4,73 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-7}$	$9,88 \times 10^{-5}$
	Membre de l'Étang-du-Nord	$1,97 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-7}$	$9,00 \times 10^{-4}$
	Membre de l'Étang-des-Caps	$5,95 \times 10^{-5}$	$4,73 \times 10^{-6}$ ( $1,00 \times 10^{-8}$ )	$7,49 \times 10^{-4}$ ( $1,00 \times 10^{-2}$ )
	Dépôts chenalisés	$1,48 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-7}$ ( $4,68 \times 10^{-6}$ )	$9,34 \times 10^{-4}$ ( $4,68 \times 10^{-5}$ )
	Tombolos de sable	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-2}$
<b>Recharge (mm/an) – Île de la Grande Entrée</b>		559	659	459
<b>Facteur multiplicateur de la recharge spatialisée issu du modèle basé sur SWB2 (-) – Île du Havre aux Maisons, île du Cap aux Meules et île du Havre Aubert</b>		1	0,8	1,2
<b>Dispersivité transversale (m)</b>		$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-5}$	2,00

### Résultats de la calibration

Sur l'île de la Grande Entrée, la piézométrie est peu élevée, et les charges observées sont inférieures à 2 m. La représentation de la piézométrie dans le modèle est d'assez bonne qualité, avec une représentation moins satisfaisante dans les puits profonds traversant l'interface (Figure A.86). Sur 20 puits, seulement une charge modélisée diffère de plus de 1 m avec les observations, et 75 % des charges modélisées présentent moins de 0,5 m de différence avec les observations. La comparaison de l'élévation de l'interface observée et simulée sur cette île est disponible à la Figure A.88.

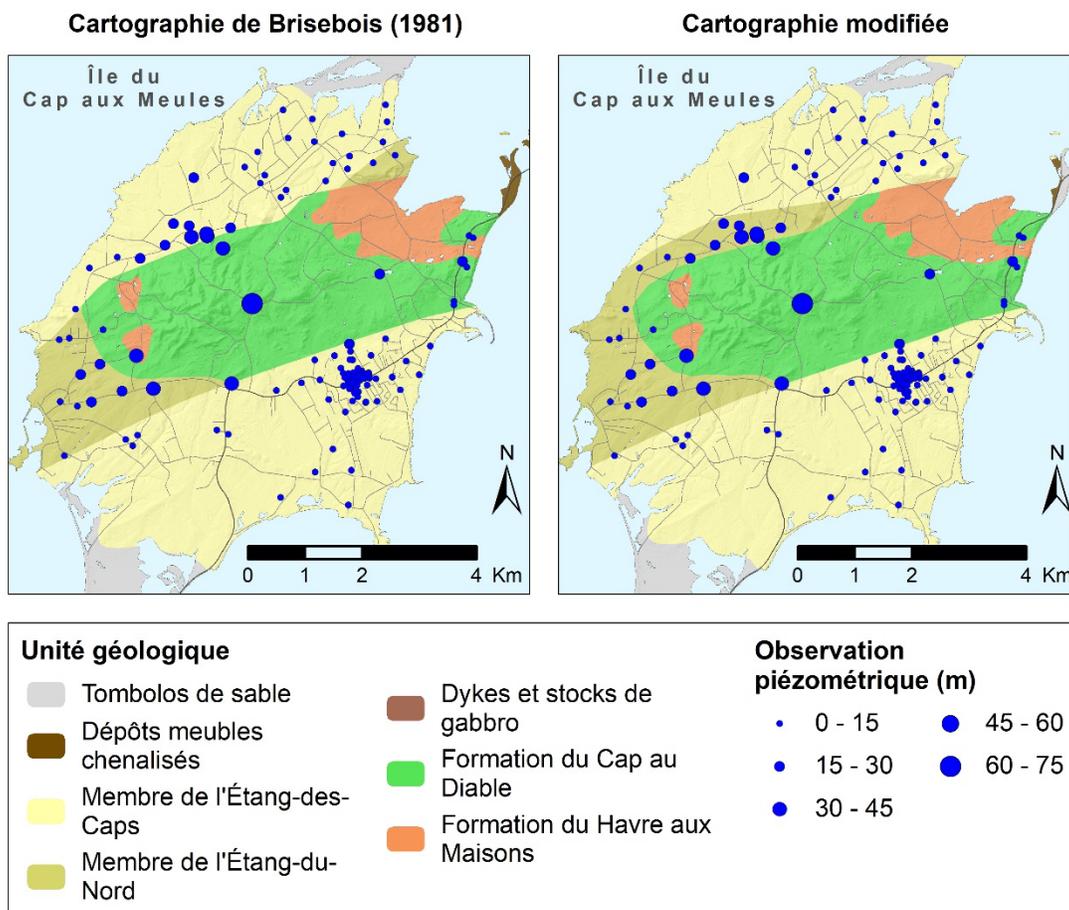
Sur l'île du Havre aux Maisons, les charges observées sur le Membre de l'Étang des Caps sont bien représentées (Figure A.86). Sur les hauteurs des butes par contre, la reproduction des charges est de moins bonne qualité, le modèle sous-estimant légèrement les charges observées. En tout sur 55 puits, seulement 2 charges modélisées diffèrent de plus de 10 m avec les observations, et 76 % des charges modélisées présentent moins de 2 m de différence avec les observations.

Lors de la calibration, sur l'île du Cap aux Meules la géologie du roc a été remise en cause dans le secteur Fatima de l'île du Cap aux Meules. Une bande de roc du Membre de l'Étang-du-Nord, d'environ 500 m de large, a été ajoutée entre les basaltes de la Formation du Cap au Diable formant les buttes du centre de l'île et les grès du Membre de l'Étang-des-Caps plus au nord, comme c'est par ailleurs le cas sur l'île du Havre aux Maisons (Figure A.85). Cette modification est principalement soutenue par les observations piézométriques directement au nord des basaltes, ainsi que par les carottes de forage de deux puits du MELCC forés en 2012 (FAT-1 et FAT2, voir base de données hydrogéologiques). Une distinction nette peut être faite entre un groupe d'observations au nord-est de l'île ne dépassant pas une charge hydraulique de 8m, et le groupe d'observations au nord-ouest montrant des charges de 13 m à 40 m. Le rabattement attendu au puits municipal P8 est d'ailleurs le plus élevé de l'île (4,4 m)

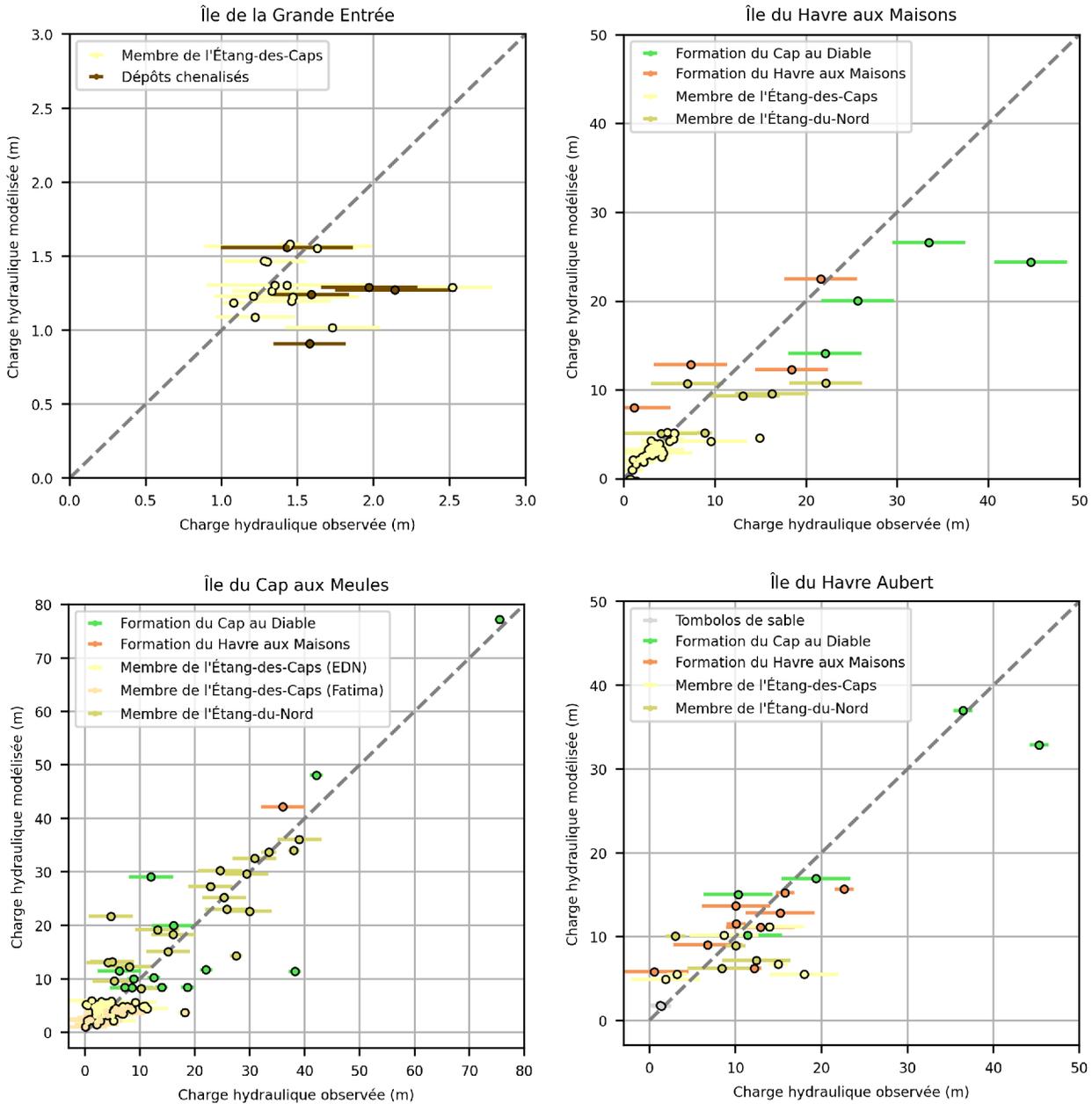
(Section 9.1.1), soutenant l'hypothèse que l'aquifère est moins perméable dans cette zone que plus en aval. La modification de la géologie a permis de reproduire de façon très satisfaisante la piézométrie dans ces deux zones. En outre, la dissociation de la conductivité hydraulique des roches du membre de l'Étang-des-Caps du secteur de Fatima de celles du secteur de l'Étang-du-Nord a permis d'améliorer significativement la reproduction des charges observées. La comparaison entre les charges piézométriques observées et simulées sur l'île du Cap aux Meules (Figure A.86). Sur les 172 données, seulement 7 charges modélisées (soit 4 %) montrent une différence de plus de 10 m avec la charge observée, et 54 % des charges modélisées présentent moins de 2 m de différence avec les observations. Les observations d'élévation de l'interface n'ont pas été utilisées dans la calibration pour l'île du Cap aux Meules, mais comparées aux résultats du modèle dans un second temps.

Sur l'île du Havre Aubert, sur 26 puits, seulement 2 charges modélisées diffèrent de plus de 10 m avec les observations, et 35 % des charges modélisées présentent moins de 2 m de différence avec les observations (Figure A.86). Ce pourcentage est plus faible que sur les autres îles, mais directement lié au fait que sur l'île du Havre Aubert, la part des observations provenant de puits situés dans le Membre de l'Étang-des-Caps est moins élevée que sur les autres îles.

Mis à part sur l'île de Grande Entrée, la calibration n'a porté que sur un seul type de données, et que les observations piézométriques n'étaient pas équitablement réparties sur le territoire. Cependant, la reproduction des observations disponibles est de bonne qualité sur l'ensemble des îles calibrées. Un autre bon indicateur de la robustesse de la calibration est la cohérence des paramètres calibrés (Tableau A.48). Pour chaque unité géologique, moins d'un ordre de grandeur sépare les conductivités hydrauliques calibrées pour chaque île. Excepté les conductivités hydrauliques du Membre de l'Étang-des-Caps, l'ensemble des conductivités calibrées sont plus faibles que les moyennes statistiques réalisées à partir de la base de données hydrogéologique. Cela pourrait s'expliquer par les spécificités du modèle (une seule couche, écoulement 2D), mais aussi par le faible nombre de données sur lesquelles sont construites les statistiques, en particulier pour les formations du Havre aux Maisons et du Cap au Diable. L'ordre croissant des unités géologiques en termes de conductivité hydraulique est le suivant : Formation Cap au Diable, Membre de l'Étang-du-Nord, Formation du Havre aux Maisons, dépôts chenalisés, Membre de l'Étang-des-Caps, tombolos de sable. La place du Membre de l'Étang-du-Nord dénote, sa conductivité hydraulique calibrée est significativement plus basse que ce à quoi on aurait pu s'attendre.



**Figure A.85 : Modification du modèle géologique sur l'île du Cap aux Meules : à gauche, géologie selon Brisebois (1981) et à droite, géologie utilisée dans la modélisation**



**Figure A.86 : Comparaison entre les charges piézométriques observées et simulées après calibration (Fatima : secteur Fatima et EDN : secteur Étang-du-Nord)**

**Tableau A.48 : Valeurs des paramètres calibrés pour chaque île. La valeur moyenne des paramètres calibrés des îles du Havre aux Maisons, Cap aux Meules et Havre Aubert est appliquée à Grosse Île, l'île aux Loups et l'île d'Entrée. FAT : secteur Fatima et EDN : secteur Étang-du-Nord**

Paramètre	Unité géologique	Île de la Grande Entrée	Île du Havre aux Maisons	Île du Cap aux Meules	Île du Havre Aubert	Moyenne
<b>Conductivité hydraulique (m/s)</b>	Formation du Havre aux Maisons	-	$8,06 \times 10^{-7}$	$2,04 \times 10^{-6}$	$7,47 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-6}$
	Formation du Cap au Diable	-	$1,49 \times 10^{-7}$	$1,79 \times 10^{-7}$	$1,82 \times 10^{-7}$	$1,70 \times 10^{-7}$
	Membre de l'Étang-du-Nord	-	$3,10 \times 10^{-7}$	$3,12 \times 10^{-7}$	$6,27 \times 10^{-7}$	$4,16 \times 10^{-7}$
	Membre de l'Étang-des-Caps	$9,64 \times 10^{-5}$	$3,02 \times 10^{-5}$	FAT : $1,07 \times 10^{-5}$ EDN : $6,28 \times 10^{-5}$	$6,31 \times 10^{-6}$	$4,13 \times 10^{-5}$
	Dépôts chenalisés	$4,70 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^{-5}$	-	$1,01 \times 10^{-5}$	$2,40 \times 10^{-5}$
	Tombolos de sable	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$9,80 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-4}$
<b>Recharge (mm/an)</b>		544	-	-	-	
<b>Facteur multiplicateur de la recharge spatialisée issu du modèle basé sur SWB2 (-)</b>		-	1,11	1,08	1,2	1,08
<b>Dispersivité transversale (m)</b>		$1,00 \times 10^{-5}$	$8,77 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$7,32 \times 10^{-5}$

### **Comparaison des rabattements observés et modélisés sous les puits municipaux**

Les charges observées aux puits municipaux n'ont pas été intégrées dans la calibration, puisque celles-ci peuvent dépendre de facteurs qui ne sont pas pris en compte dans le modèle, par exemple le type de crépine, des conditions hydrogéologiques très locales, ou le colmatage éventuel du puits. Néanmoins, après calibration, il est intéressant d'évaluer la correspondance entre les rabattements auxquels on pourrait s'attendre aux puits municipaux et les résultats de modélisation. En particulier, on cherche à évaluer l'efficacité du module de correction des charges MNW2.

Dans la base de données hydrogéologique, on dispose d'informations sur des essais de pompages réalisés dans des puits municipaux, notamment les rabattements associés aux débits des essais. Parmi les essais de pompage répertoriés dans la base de données hydrogéologiques, 36 essais effectués dans 30 puits municipaux différents disposent à la fois des données de durée, de débit et de rabattement observé. Parmi eux, neuf essais durent 12 h ou moins, ce qui est considéré comme insuffisant pour que le rabattement soit stabilisé et ceux-ci sont donc exclus de la sélection. Il reste donc 27 essais (dans 20 puits différents) qui durent plus de 22 h, dont 12 essais (dans 10 puits différents) qui durent plus de 72 h. Les débits utilisés lors des essais de pompages sont plus élevés que les débits moyens d'exploitation considérés dans les simulations dans la grande majorité des cas (25 essais sur 27). Ainsi, les rabattements observés lors des essais sont aussi plus élevés que ceux attendus par les débits moyens d'exploitation (période 2002-2020). Les rabattements attendus ont été calculés par une interpolation linéaire à partir des données de débit et de rabattements des essais (Tableau A.49).

Pour les puits dont on dispose de plusieurs essais de pompage, les rabattements attendus montrent parfois une grande variabilité, comme c'est le cas pour PU1, PU7 et PU8 sur l'île du Cap aux Meules

(Tableau A.49). Les essais répertoriés pour chacun de ces puits sont similaires en termes de durée et de débit, mais différent sur le rabattement observé.

Sur l'île du Havre aux Maisons, les rabattements attendus, disponibles pour les puits P1 et P4 seulement, sont de 0,60 et entre 1,93 m et 2,91 m respectivement (Tableau A.49). L'île du Cap-aux-Meules est l'île pour laquelle les rabattements attendus sont les plus variés, entre 0,40 m à 6,47 m selon les puits. Les rabattements observés aux puits municipaux de l'île du Havre Aubert, très proches les uns des autres, sont parmi les plus importants du territoire, avec 5,71 m pour P3 et 3,19 m pour P4. Sur l'île de la Grande Entrée, les taux de pompage sont nettement plus faibles que sur les autres îles et le rabattement attendu est situé entre 19 cm et 30 cm.

Les rabattements obtenus dans les modèles sont en moyenne deux fois plus faibles que les rabattements attendus. La plus grande différence se situe sur l'île de la Grande Entrée, où les rabattements modélisés sont en moyenne huit fois plus faibles. La sous-estimation des rabattements dans les modèles peut s'expliquer par la taille du maillage (20 m par 20 m), beaucoup plus large que le diamètre du puits. La correction apportée par le module MNW2 ne semble pas suffisante pour représenter correctement les rabattements.

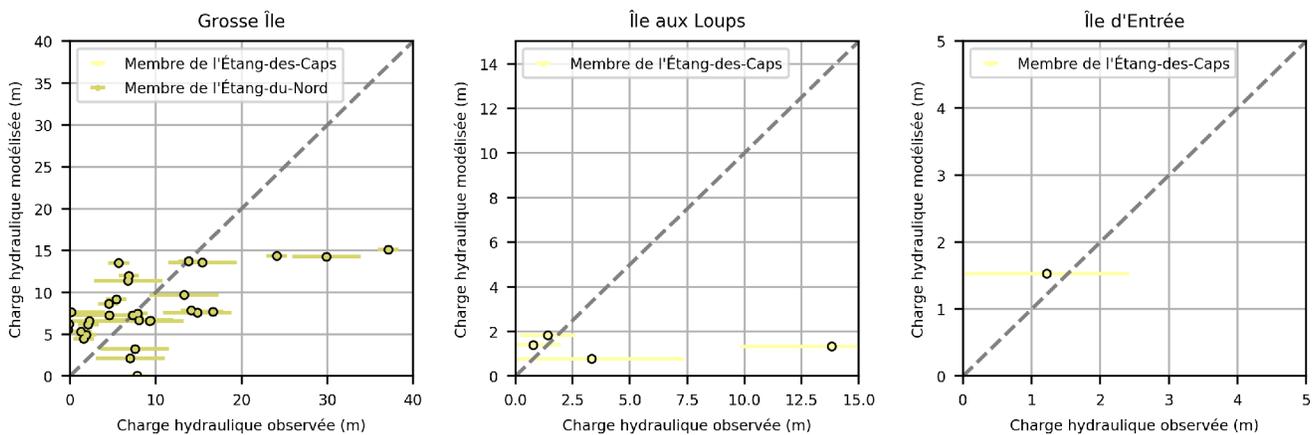
**Tableau A.49 : Comparaison des rabattements attendus et modélisés aux puits municipaux pour le débit moyen exploité sur la période 2002-2020**

Île	Puits	Année de l'essai	Rabattement moyen attendu (m)	Rabattement moyen modélisé (m)	Rapport rabattement modélisé / rabattement attendu
Havre aux Maisons	P1	2003	0,60	0,64	106 %
	P4	1993	2,91	0,49	17 %
		2019	1,93		25 %
		2020	1,97		25 %
Cap aux Meules – secteur Fatima	P7	2020	6,47	7,20	111 %
	P8	2003	4,43	5,49	124 %
	PU1	1975	0,46	0,45	97 %
		2003	1,58		28 %
	PU2	1975	2,39	0,62	26 %
		2003	4,83		13 %
	PU3	1975	5,87	0,56	10 %
2003		3,37	17 %		
Cap aux Meules – secteur Étang-du-Nord	P1	2020	0,83	0,51	62 %
	P3	2003	1,90	0,65	34 %
	P4	2020	2,19	0,60	27 %
	PU6	2003	1,18	0,68	58 %
	PU7	1975	1,15	0,61	53 %
		2003	0,40		151 %
	PU8	1975	1,28	0,62	49 %
		2003	0,59		105 %
PU9	2003	0,44	0,43	98 %	
Havre Aubert	P3	1998	5,71	1,95	34 %
	P4	1998	3,19	1,82	57 %
Grande Entrée	FE-06-03	2006	0,30	0,04	14 %
	FE-06-04	2006	0,25	0,02	8 %
	FE-06-05	2006	0,25	0,02	8 %
	FE-06-06	2006	0,19	0,03	16 %

**Comparaison des observations piézométriques et de la modélisation sur la Grosse Île, l'île aux Loups et l'île d'Entrée**

La moyenne des valeurs de chaque paramètre calibré pour les 4 îles a été calculée (Tableau A.48) et appliquée sur les trois îles restantes : la Grosse Île, l'île aux Loups et l'île d'Entrée. La correspondance entre les observations piézométriques et les résultats de modélisation n'est pas complètement satisfaisante. Sur la Grosse Île et l'île aux Loups, la modélisation du centre des îles sous-estime les charges hydrauliques. Sur l'île aux Loups, connaissant la taille de l'île et sa géologie (Tombolos de sable, Membre de l'Étang-des-Caps et dépôts chenalisés), on peut émettre un doute raisonnable quant à la fiabilité des mesures des puits de charge dépassant 2 m. Sur la Grosse Île, l'altitude maximale dépasse

les 80m au-dessus du niveau de la mer. Les charges observées à l’aplomb de ce relief sont de l’ordre de 30 m à 40m, contre une quinzaine de mètres pour les résultats de modélisation. De manière générale sur les îles de taille réduite, il est possible que l’hypothèse selon laquelle la conductivité hydraulique est uniforme au sein d’une même unité géologique soit trop simplificatrice à cette échelle.



**Figure A.87 : Comparaison entre les charges piézométriques observées et simulées sur la Grosse Île, l’île aux Loups et l’île d’Entrée**

### ***Comparaison des mesures de profondeur de l’interface eau douce – eau salée et de la modélisation***

Les résultats spatialisés de l’élévation et de la profondeur de l’interface eau douce – eau salée sont issus des modèles qui s’appuient essentiellement sur des données de piézométrie. À l’exception de l’île de la Grande Entrée, les mesures directes des profils de conductivité électrique réalisés dans huit puits profonds qui traversent l’interface (sept sur l’île de la Grande Entrée et un sur l’île du Cap aux Meules – Section 4.2.5) et les mesures indirectes de profondeur d’interface eau douce – eau salée issues des nombreux relevés géophysiques (Section 4.1.3) n’ont pas servi aux processus de calibration. Leur comparaison avec les résultats des modèles permet tout de même d’évaluer la performance de la modélisation.

Une équipe de géophysiciens de l’INRS-ETE a été mobilisée pour interpréter les mesures de trois campagnes de relevés géophysiques et évaluer leur qualité : TRE par le Groupe Madelin’eau en 2003 et 2004, mesures TDEM par l’École Polytechnique de Montréal en 2009 et 2014, et mesures TDEM par l’INRS-ETE et l’Université Laval en 2019 (Section 4.1.3). L’interprétation des relevés a été réalisée pour les îles de la Grande Entrée, du Havre aux Maisons et du Cap aux Meules.

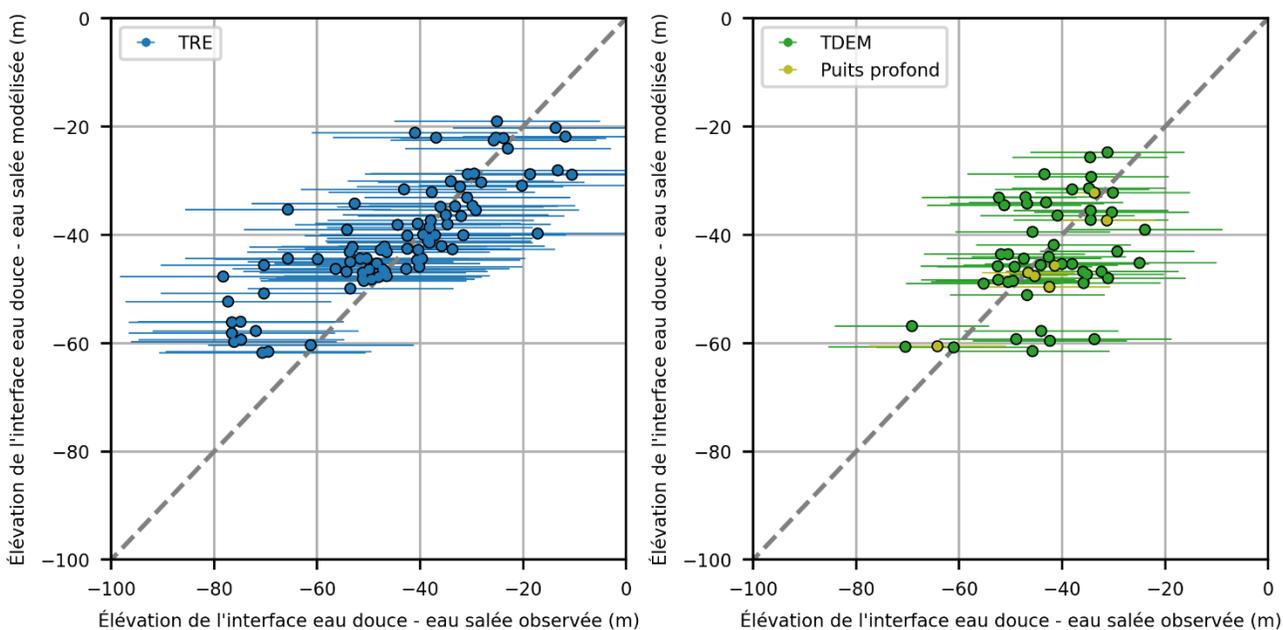
Les relevés TRE forment des transects continus. Pour les comparer aux résultats de modélisation, les points centraux des blocs utilisés pour l’interprétation des profils ont été retenus. L’interprétation des relevés TRE a été réalisée à une profondeur maximale d’investigation estimée à 80 m, pour différents seuils de résistivité de l’eau salée (5  $\Omega$  m, 10  $\Omega$  m, 15  $\Omega$  m et 20  $\Omega$  m). La profondeur de l’interface eau douce – eau salée retenue est la valeur moyenne des profondeurs auxquelles l’eau salée semble avoir été observée.

Pour les relevés TDEM, l'évaluation de la qualité des inversions des mesures se base sur deux critères : d'une part la profondeur maximale d'investigation (205 m pour le dispositif utilisé par l'École Polytechnique de Montréal (Chouteau et coll., 2011) et 80 m pour celui utilisé par l'INRS-ETE et l'Université Laval) et d'autre par la cohérence des profondeurs d'interface estimées avec celles des sondages voisins. La confrontation des mesures à la profondeur de l'interface obtenue en appliquant la formule de Ghyben-Herzberg sur des données de piézométrie a confirmé que sur les zones où l'interface dépasse 200 m sous la surface, les mesures géophysiques n'étaient pas cohérentes et sous-estimaient largement la profondeur de l'interface.

La probabilité que l'erreur des relevés TRE et TDEM interprétés soit inférieure à 20 m et 15 m respectivement de la position réelle de l'interface eau douce – eau salée est de 95 %.

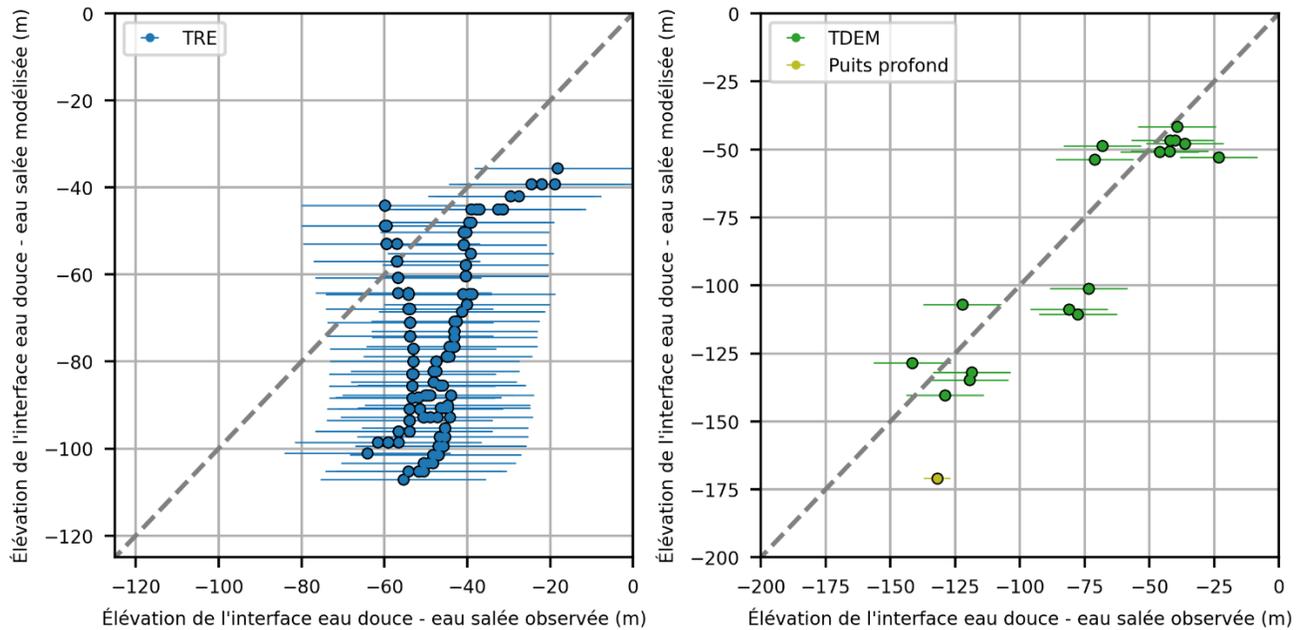
Les interprétations des relevés géophysiques ne sont concluantes que pour les îles de la Grande Entrée et du Cap aux Meules. Sur l'île du Havre-aux-Maisons, les mesures sont contradictoires ou réalisées sur des zones où l'eau salée est trop profonde pour être détectée.

Sur l'île de la Grande Entrée, les mesures de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée ayant servi à la calibration sont issues de sept puits profonds, de onze transects TRE et de 47 relevés TDEM, réparties sur tout le territoire (Figure 4.1 de la Section 4.1.3). La représentation dans le modèle des mesures directes dans les puits profonds est de très bonne qualité. En ce qui concerne les observations de TDEM et TRE, le résultat est plus variable, mais reste très satisfaisant (Figure A.88) : 92 % des élévations modélisées sous les points TRE diffèrent de moins de 20 m des mesures et 85 % des élévations modélisées sous les observations TDEM diffèrent de moins de 15 m des mesures.



**Figure A.88 : Comparaison de l'interface eau douce – eau salée observée (TRE à gauche et TDEM à droite) et modélisée sur l'île de la Grande Entrée. Les barres d'erreur correspondent aux incertitudes à 95 % associées à chaque méthode de mesure**

Sur l'île du Cap aux Meules, les mesures de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée exploitables sont issues d'un puits profond, de deux transects TRE et 17 relevés TDEM. Les relevés géophysiques sont situés dans les parties les plus proches de la côte, là où l'interface eau douce – eau salée est peu profonde (Figure 4.1 de la Section 4.1.3). La reproduction des élévations de l'interface par le modèle est d'assez bonne qualité, en particulier pour les données TDEM (Figure A.89). L'interface eau douce – eau salée modélisée sous les relevés TRE s'enfonce en profondeur en s'éloignant de la côte plus rapidement que ce que suggèrent les mesures, et la majorité des valeurs modélisées surestiment la profondeur de l'interface par rapport aux relevés. La moitié des élévations modélisées sous les relevés TDEM diffèrent de moins de 15 m des mesures et seulement le tiers des élévations modélisées sous les points TRE diffèrent de moins de 20 m des mesures.



**Figure A.89 : Comparaison de l'interface eau douce - eau salée observée (TRE à gauche et TDEM à droite) et modélisée sur l'île du Cap aux Meules. Les barres d'erreur correspondent aux incertitudes à 95 % associées à chaque méthode de mesure**

## **Annexe 12 : Méthodologie pour les simulations d'exploitation durable de la ressource**

### **Optimisation des pompages municipaux**

L'objectif de l'optimisation des pompages municipaux est de maximiser le pompage tout en évitant la salinisation des puits municipaux par la remontée de l'interface eau douce – eau salée. Les éléments essentiels à la compréhension du problème d'optimisation sont présentés ici, mais les détails sur la résolution mathématique et son implémentation sont donnés par Coulon et coll. (2022) et White et coll. (2018).

Le modèle numérique d'écoulement calibré est la pierre angulaire de la démarche d'optimisation. Ainsi l'optimisation s'effectue à partir des modèles numériques calibrés présentés précédemment. L'approche s'apparente grandement à la démarche de calibration des modèles, mais plutôt que de faire varier les paramètres du modèle afin de reproduire le plus fidèlement possible les observations, l'optimisation consiste à faire varier les débits de pompage au sein d'un modèle calibré en cherchant le débit maximal qui permet d'éviter tout juste une contamination des puits. Sans entrer dans les détails qui seront présentés ultérieurement, on considérera qu'un puits est contaminé si le ratio de mélange d'eau salée/eau douce est de 1 %. Les contraintes du problème d'optimisation s'assureront donc que l'isocontour de salinité de 1 % dans l'aquifère n'atteigne pas la base des puits de pompages. Pour chaque combinaison de débits de pompage imposée au modèle, ce dernier est tout d'abord lancé avec des conditions initiales représentatives de l'aquifère au repos sans pompage. Les pompages sont ensuite démarrés au sein du modèle jusqu'à ce que la nappe et l'interface eau douce – eau salée atteignent un régime permanent. Le respect des contraintes d'optimisation est alors vérifié et une nouvelle combinaison de débits de pompage est calculée à partir de cette vérification. Le modèle est ensuite relancé avec cette nouvelle combinaison de débits. Ce processus itératif se répète jusqu'à l'obtention des débits de pompage maximaux qui respectent les contraintes d'optimisation et évitent la salinisation des puits. Il est important de mentionner que pour diminuer les temps de calcul parfois considérables de l'optimisation, les calculs ont été parallélisés sur les serveurs de Calcul Canada.

### **Formulation du problème**

En termes mathématiques, le problème d'optimisation se traduit par la maximisation d'une fonction objectif  $\varphi$  sujette aux contraintes suivantes :

$$\text{Maximiser : } \varphi = \sum_{i=1}^n Q_i \quad , \quad \text{en respectant : } \zeta_{1\%i} \leq z_{\text{botm}_i} \quad , \quad i \in \mathbb{N}^+ \quad (5)$$

où  $Q_i$  est le débit de pompage du puits  $i$ ,  $n$  est le nombre total de puits,  $\zeta_{1\%i}$  est l'élévation du contour de salinité de 1 % sous le puits  $i$  et  $z_{\text{botm}_i}$  est l'élévation de la base du puits  $i$ . Les débits de pompage  $Q_i$  et l'élévation de l'isocontour sous les puits  $\zeta_{1\%i}$  sont définis respectivement comme les variables de décisions et les contraintes dérivées du modèle. On dit que les contraintes sont dérivées du modèle puisqu'en effet, l'élévation du contour de salinité est calculée préalablement par le modèle numérique calibré et dépend directement des variables de décisions (débits de pompage).

### **Algorithme SLP**

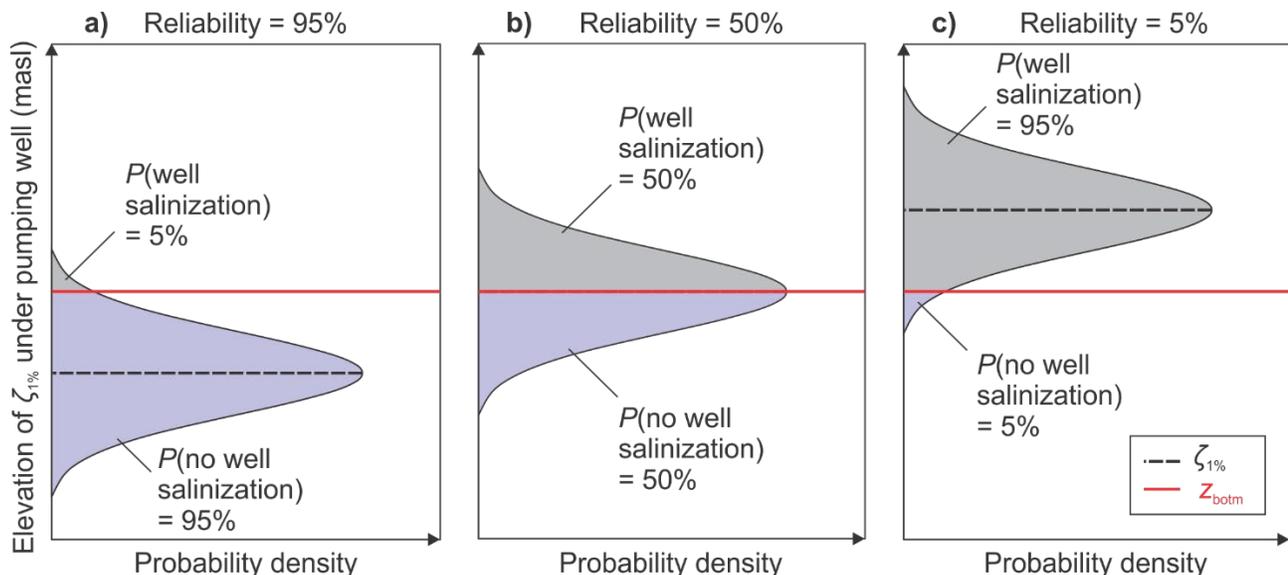
Le problème d'optimisation est résolu par le biais d'un algorithme SLP (*Sequential Linear Programming*) qui est implémenté dans le programme PESTPP-OPT (White et coll., 2018). Le fonctionnement de ce programme s'appuie sur 3 hypothèses qu'il est nécessaire de satisfaire :

1. La fonction objectif  $\varphi$  doit s'exprimer comme une combinaison linéaire des variables de décisions;
2. La relation entre les variables de décisions et les contraintes dérivées du modèle doit être approximativement linéaire;
3. La relation entre les paramètres du modèle et les contraintes dérivées du modèle doit être approximativement linéaire.

Avant d'entreprendre la résolution du problème d'optimisation, une vérification minutieuse de ces 3 hypothèses a été réalisée. Premièrement, notre problème a été formulé par le biais d'une fonction objectif s'exprimant comme une combinaison linéaire des variables de décisions (voir équation 5). Nous avons aussi observé une relation linéaire entre les variables de décisions et les contraintes du modèle et entre les paramètres et les contraintes en utilisant l'outil JACTEST de la suite PEST (Doherty, 2004)).

### **Optimisation sous incertitudes**

Les incertitudes associées aux paramètres calibrés du modèle ainsi que celles associées aux observations ayant servi à contraindre la calibration vont nécessairement se propager à travers le modèle et imprégner les sorties du modèle d'incertitude. Dans notre cas, les contraintes d'optimisations ( $\zeta_{1\%_i}$ ) sont des sorties du modèle, elles sont donc empreintes d'une incertitude qu'il est important de bien quantifier. PESTPP-OPT permet de prendre en considération l'incertitude associée aux paramètres et aux observations et son impact sur l'incertitude des contraintes d'optimisation. Les contraintes ne sont donc pas décrites par une seule valeur numérique, mais bien par une densité de probabilité gaussienne centrée sur la valeur moyenne calculée par le modèle numérique et dont l'écart-type est calculé à l'aide d'une analyse FOSM (*First-order, second-moment*) au sein de PESTPP-OPT. Le respect des contraintes d'optimisation ( $\zeta_{1\%_i} \leq z_{\text{botm}_i}$ ) se fait donc dans un cadre probabiliste où on accorde une probabilité de respect des contraintes en fonction d'un niveau de tolérance au risque. Tel que l'illustre la Figure A.90, l'élévation du contour de salinité de 1 % ( $\zeta_{1\%_i}$ ) provenant du modèle numérique d'écoulement est caractérisée par une distribution probabiliste qui reflète le niveau d'incertitude entourant cette valeur. Si la distribution du contour de salinité de 1 % est centrée directement sur la valeur d'élévation de la base du puits, la nature probabiliste de la distribution nous informe qu'il y a 50 % de chance que la contrainte ne soit pas respectée et qu'il y ait salinisation du puits. Il y a aussi 50 % de chance que le contour de salinité soit en réalité sous la base du puits et qu'il n'y ait pas de salinisation. Ainsi, la contrainte d'optimisation variera en fonction de la probabilité de salinisation du puits que l'on considère. Le risque de salinisation considéré influencera ainsi les résultats de l'optimisation : un risque faible de salinisation sera lié à une valeur de contrainte plus conservatrice qui impliquera un débit optimisé plus faible, et vice-versa. Dans le cadre de ce projet, le problème d'optimisation sera résolu pour une gamme de valeurs de risque de salinisation variant entre 1 % et 99 %.



**Figure A.90 : Distributions de probabilités de l’élévation du contour de salinité de 1 % sous la base d’un puits de pompage pour des optimisations où le risque de salinisation est de : a) 5 %, b) 50 % et c) 95 %. La ligne rouge indique la base du puits de pompage. (Figure tirée de Coulon et coll. (2022))**

### Méthodologie

#### Définition de la salinisation des puits pour l’optimisation

Tel que détaillé précédemment, les modèles numériques d’écoulement calibrés modélisent une interface eau douce – eau salée abrupte. Cette interface représente l’isocontour de salinité de 50 % (ratio de mélange eau douce/eau salée). En réalité, l’interface n’est pas abrupte, et une certaine dispersion de la salinité a lieu autour de l’isocontour de salinité de 50 %, cette dispersion n’est cependant pas considérée dans les modèles numériques développés. En pratique, lors d’un pompage, un puits captera de l’eau salée avant que le contour de salinité de 50 % n’atteigne sa base. Il est donc nécessaire de décrire cette dispersion et de définir une contrainte d’optimisation en fonction de celle-ci.

Un ratio de mélange de 1 % d’eau salée/eau douce correspond à une concentration en solides dissous totaux (TDS) d’environ 350 mg/L, équivalant à environ 190 mg/L de chlorure. En comparaison, la limite esthétique pour l’eau potable est fixée à 250 mg/L de chlorure (WHO, 2003). Dans le cadre de cette étude, on considérera de manière plutôt conservatrice qu’un puits est contaminé si une concentration de 190 mg/L de chlorure (ratio de 1 % d’eau salée/eau douce) atteint la base du puits de pompage.

Il est donc nécessaire de décrire la dispersion de la salinité afin d’estimer l’isocontour de salinité de 1 % à partir de l’isocontour de 50 % provenant du modèle numérique (calculé à l’aide du module SWI2, voir Annexe 10 pour plus de détails sur la construction des modèles). Deux étapes de post-traitement sont nécessaires pour obtenir l’isocontour de salinité de 1 % ( $\zeta_{1\%_i}$ ) à partir de l’interface abrupte simulée par SWI2 : 1) appliquer une correction liée au maillage à l’élévation de l’interface sous les puits de pompage, et 2) appliquer une correction pour la dispersion de la salinité.

### 1) Correction de la remontée de l'interface aux puits de pompage :

Tel que présenté à l'Annexe 11, les modèles numériques développés sont discrétisés spatialement par des mailles de 20 m par 20 m. Le rabattement modélisé sous un puits de pompage est sous-estimé, car cette discrétisation ne permet pas de représenter adéquatement les écoulements à l'échelle d'un puits individuel. Une correction est donc appliquée à l'aide du module MNW2 afin d'estimer plus fidèlement la charge au niveau du puits ( $h_{\text{well}}$ ) à partir de la charge associée à la maille ( $h_{\text{cell}}$ ).

La charge hydraulique associée à une maille du modèle ne représentant pas fidèlement le rabattement sous un puits de pompage, il en est de même pour la remontée de l'interface qui sera sous-estimée. Une correction est donc aussi appliquée à l'élévation de l'interface de la maille contenant un puits de pompage ( $\zeta_{\text{cell}}$ ) afin d'obtenir une représentation plus réaliste de l'élévation de l'interface sous le puits de pompage ( $\zeta_{\text{well}}$ ) :

$$\zeta_{\text{well}} = \zeta_{\text{cell}} + \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} (h_{\text{cell}} - h_{\text{well}}) \quad (6)$$

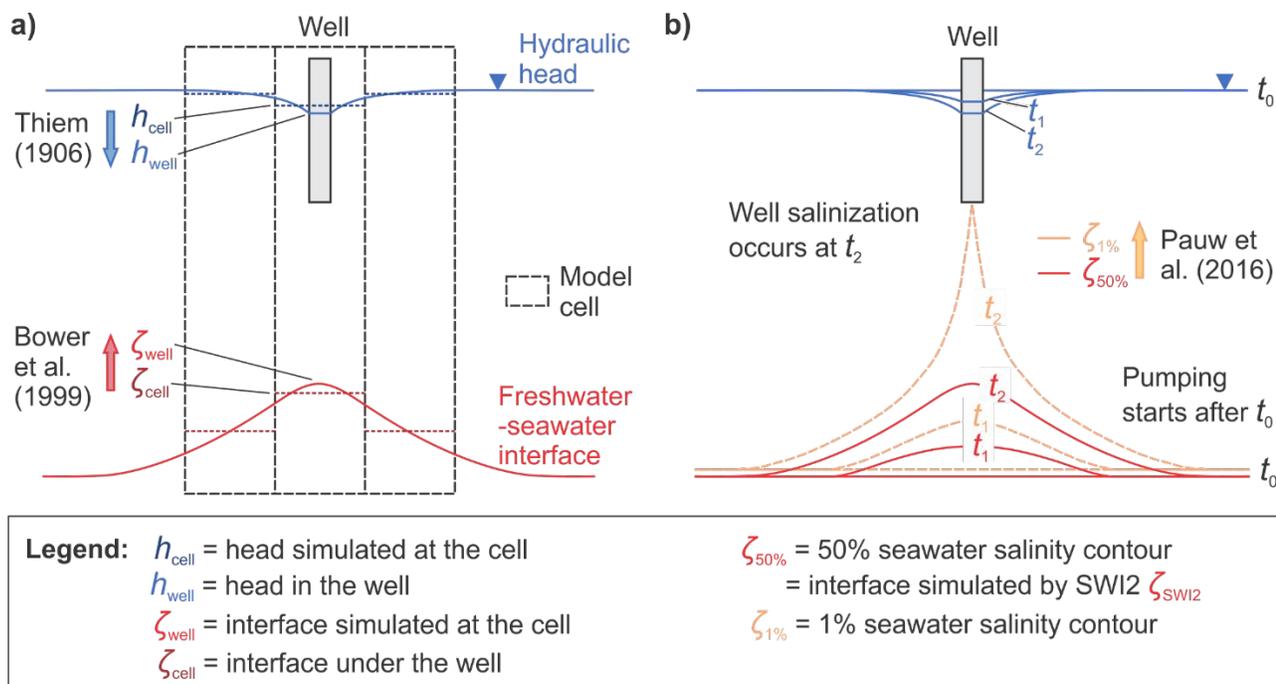
où  $\rho_f$  et  $\rho_s$  sont les densités de l'eau douce et de l'eau salée respectivement. La Figure A.91 a) illustre bien l'effet de cette correction. Pour plus de détails sur la dérivation de l'équation 6, veuillez vous référer à Coulon et coll. (2022).

### 2) Correction pour la dispersion de la salinité :

L'élévation de l'interface modélisée par SWI2 et corrigée par l'équation 7 (que nous noterons désormais  $\zeta_{50\%}$ ) est ensuite utilisée pour estimer l'élévation de l'isocontour de salinité de 1 % ( $\zeta_{1\%}$ ) à l'aide de la correction analytique suivante :

$$\zeta_{1\%} = \zeta_{50\%} + 2\sqrt{b M^2 + \alpha_L |\zeta_{50\%} - \zeta_{\text{init}}|} \operatorname{erfc}^{-1}(c) \quad (7)$$

où  $b = 0.032$  et  $c = 0.02$  sont des constantes,  $M$  est la largeur initiale de la zone de transition (m) que nous définirons ultérieurement,  $\alpha_L$  est la dispersivité longitudinale (m) et  $\zeta_{\text{init}}$  est l'élévation de l'interface eau douce – eau salée sous le puits lorsqu'il n'y a aucun pompage (condition initiale en entrée des modèles numériques). La Figure A.91 b) illustre bien l'effet de cette correction. Les détails de la dérivation de cette équation de dispersion sont présentés par Coulon et coll. (2022). L'application de cette équation dans notre démarche de modélisation introduit deux nouveaux paramètres : la largeur initiale de la zone de transition ( $M$ ) et la dispersivité longitudinale ( $\alpha_L$ ). L'incertitude associée à ces paramètres devra être considérée lors de la résolution du problème d'optimisation sous incertitudes.



**Figure A.91 : Étapes de post-traitement pour obtenir l'isocontour de salinité de 1 % à partir l'interface abrupte en sortie du modèle numérique d'écoulement : a) Correction de la remontée de l'interface aux puits de pompage, b) Correction pour la dispersion de la salinité. (Figure tirée de Coulon et coll. (2022))**

Les étapes de correction précédentes ont permis l'obtention de l'isocontour de salinité de 1 % sous un puits de pompage ( $\zeta_{1\%}$ ) à partir de l'élévation de l'isocontour de 50 %. Pour procéder à l'optimisation sous incertitudes, il reste à définir les incertitudes liées aux paramètres du modèle afin de caractériser la distribution statistique associée au contour de salinité de 1 %.

### **Incertitudes associées aux paramètres**

#### *Conductivités hydrauliques*

La démarche d'optimisation requiert les incertitudes caractérisant les paramètres du modèle avant le processus de calibration. Ainsi, les mêmes incertitudes (intervalles de confiance de 95 %) associées aux conductivités hydrauliques ayant servi à la calibration ont été utilisées pour l'optimisation (voir Tableau 8.2, Section 8.1).

#### *Recharge*

Tel que présenté dans le cadre du développement des modèles numériques, la recharge a été modélisée dans un premier temps avec le modèle SWB2. Cette recharge spatialisée a ensuite été insérée dans les modèles numérique et considérée dans le processus de calibration par le biais d'un coefficient multiplicateur. Cette méthodologie a été appliquée à toutes les îles de l'archipel à l'exception de Grande Entrée, où une seule valeur de recharge a été imposée à tout le domaine de modélisation. Pour l'optimisation, aucune incertitude n'a été considérée sur la recharge pour la situation actuelle (sans changements climatiques). Les estimations de la recharge à l'horizon 2050 (voir Section 8.4.3.2) ont

permis de conclure que les changements climatiques n'auront aucun effet significatif sur l'amplitude de la recharge. Les résultats des 72 scénarios climatiques ont permis d'obtenir un écart-type de 108 mm sur la recharge en 2050. Ainsi, les coefficients multiplicateurs de la recharge calibrés sont les mêmes pour les optimisations avec et sans changements climatiques. Cependant, une incertitude a été introduite pour l'optimisation avec changements climatiques pour refléter un écart-type de 108 mm sur le coefficient multiplicateur. Pour ce faire, les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance de 95 % du coefficient multiplicateur ont été calculées ainsi :

$$\text{Bornes} = \frac{\text{Rech}_{\text{moy}} \pm 2\sigma}{\text{Rech}_{\text{moy}}} \quad (8)$$

où  $\text{Rech}_{\text{moy}}$  est la recharge moyenne sur le domaine de modélisation et  $\sigma$  est l'écart-type de 108 mm.

#### *Niveau moyen de la mer*

Le niveau moyen de la mer aux îles de la Madeleine est situé à 0,168 m au-dessus du niveau moyen des mers de la référence altimétrique CGVD28 (voir Section 2.3.8). Une estimation de l'augmentation du niveau de la mer d'ici 2050 a été réalisée par Barnett et coll. (2017). À partir des résultats présentés à la figure 12 de leur article, on remarque une augmentation du niveau moyen de la mer de 0,19 m de 2020 à 2050. L'incertitude (écart-type) associée au niveau moyen de la mer en 2050 est de 0,12 m. Ainsi, dans le cadre de l'optimisation, les valeurs présentées au tableau suivant ont été utilisées :

**Tableau A.50 : Statistiques sur le niveau moyen de la mer**

	Niveau moyen de la mer (m/nmm)	
	Sans changements climatiques	Avec changements climatiques
Borne inférieure ( $\mu - 2\sigma$ )	-	0,118
Valeur moyenne ( $\mu$ )	0,168	0,358
Borne supérieure ( $\mu + 2\sigma$ )	-	0,598

#### *Dispersivité longitudinale*

La modélisation de la dispersion de la salinité par l'équation analytique présentée précédemment introduit un nouveau paramètre : la dispersivité longitudinale. Pour les îles de l'archipel, le contour de salinité de 50 % ( $\zeta_{50\%}$ ) est situé de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de la base des puits de pompage. L'échelle de transport est donc considérable. Il a cependant été jugé acceptable et conservateur de ne pas utiliser une valeur trop élevée de dispersivité longitudinale pour représenter de façon réaliste le processus de dispersion de la salinité. Un jugement d'expert a permis de fixer la valeur de dispersivité longitudinale à 10 m avec un écart-type de 1 m.

#### *Largeur initiale de la zone de transition*

La largeur initiale de la zone de transition ( $M$ ) se définit comme la largeur de l'intervalle de confiance de 95 % ( $M = 4\sigma$ ) centrée autour du contour de salinité de 50 % lorsqu'aucun pompage n'est considéré, en assumant une distribution gaussienne de la salinité. Les profils de conductivités électriques collectés

dans des puits profonds ont permis d'estimer la largeur initiale de la zone de transition ainsi que son incertitude. Les puits profonds considérés sont situés assez loin des puits municipaux pour qu'ils ne soient pas affectés par les pompages. La zone de transition ainsi estimée est donc représentative des conditions naturelles existantes avant l'introduction des pompages municipaux.

Les différents profils de conductivité électrique mesurée (courbes bleues sur la Figure A.92) peuvent être modélisés par une fonction erreur de la forme suivante (courbe en rouge sur la Figure A.92) :

$$F(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z_0 - z}{\varphi} \right) \right] \quad (9)$$

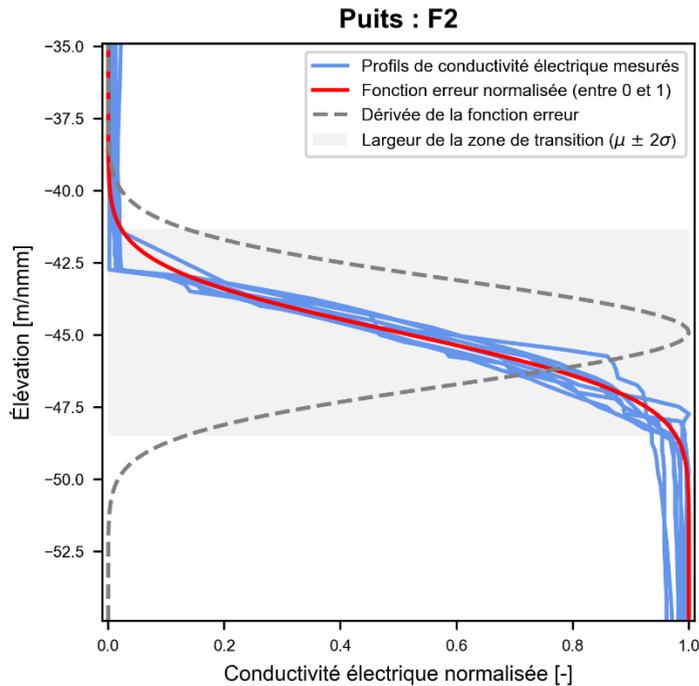
où  $z$  est l'élévation verticale,  $z_0$  est le point d'inflexion de la fonction  $F(z)$  (associé au contour de salinité de 50 %) et  $\varphi$  est un paramètre d'ajustement. L'ajustement de la fonction  $F(z)$  à un profil de conductivité électrique permet l'obtention d'un profil théorique. Ce profil théorique a la forme de la fonction de répartition de la loi normale. La dérivée de la fonction de répartition permet d'obtenir la densité de probabilité ( $f(z)$ ) qui elle permettra de décrire la dispersion (écart-type) de la zone de transition autour de sa moyenne ( $z_0$ ). Ainsi :

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz} = -\frac{1}{\varphi\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{z_0-z}{\varphi}\right)^2} \quad (10)$$

On obtient bel et bien une distribution gaussienne d'écart-type  $\sigma = \varphi/\sqrt{2}$ . La largeur initiale de la zone de transition, selon la définition présentée précédemment, peut ainsi s'exprimer :

$$M = 4\sigma = \frac{4\varphi}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

où  $\varphi$  est obtenu en ajustant la fonction erreur  $F(z)$  au profil de conductivité électrique.



**Figure A.92 : Profils de conductivité électrique mesurés dans le puits profond F2 situé sur l’île de la Grande Entrée. La courbe en rouge est la fonction erreur  $F(z)$  ajustée aux profils mesurés. La courbe en pointillés est la densité de probabilité  $f(z)$  associée à la zone de transition**

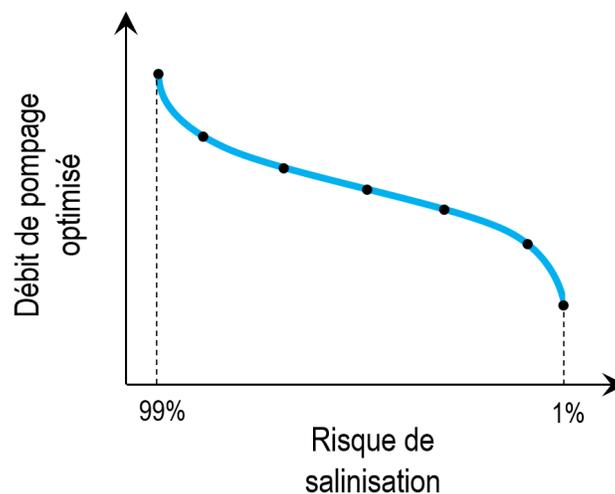
L’ensemble des profils de conductivité électrique récoltés dans cinq puits différents de l’île de la Grande Entrée (F1, F2, F3, F4 et GE01) ont permis d’obtenir en moyenne une largeur initiale de la zone de transition de 6,76 m. La distribution des valeurs de  $M$  estimées est cependant plus fidèlement représentée par une distribution log-normale. L’incertitude sur la valeur de  $M$  n’est donc pas symétrique autour de sa valeur moyenne. Le tableau suivant présente les statistiques calculées pour l’optimisation sous incertitude :

**Tableau A.51 : Statistiques sur la largeur initiale de la zone de transition**

	Largeur initiale de la zone de transition (m)
Borne inférieure ( $\mu - 2\sigma$ )	3,00
Valeur moyenne ( $\mu$ )	6,76
Borne supérieure ( $\mu + 2\sigma$ )	15,22

### **Interprétation des résultats**

Les contraintes et les incertitudes des paramètres étant bien définies, il suffit de fixer une valeur de risque de salinisation pour que le programme PESTPP-OPT effectue la résolution du problème d'optimisation sous incertitudes. PESTPP-OPT fournit en sortie les débits optimisés à chaque puits de pompage pour un risque de salinisation donné. Le risque de salinisation souhaité doit être établi par les gestionnaires du réseau de pompage municipal en fonction de leur tolérance au risque. La présente étude n'a pas pour objectif de faire de recommandations quant au risque de salinisation à adopter. Ainsi, la résolution du problème d'optimisation a été réalisée à maintes reprises pour une gamme de valeur de risque de salinisation entre 1 % et 99 %. Il est ainsi possible d'observer le débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation. Une courbe typique des résultats d'optimisation sous incertitudes est présentée à la Figure A.93.



**Figure A.93 : Courbe typique du débit de pompage optimisé en fonction du risque de salinisation**

Un résultat typique d'optimisation présentera une diminution du débit de pompage optimisé avec une diminution du risque de salinisation. Plus le risque de salinisation diminue, plus la distribution de probabilité de l'isocontour de salinité de 1 % se décale vers le bas et s'éloigne de la base du puits de pompage (voir Figure A.91(a)). La contrainte d'optimisation étant ainsi décalée, le débit de pompage occasionnant une contamination du puits sera diminué.

Les gestionnaires du réseau municipal sont encouragés à choisir eux-mêmes leur tolérance au risque en fonction des enjeux qui leur sont propres. La notion de risque est intéressante à proposer, car elle rappelle qu'une augmentation du pompage s'accompagne nécessairement d'un risque accru de salinisation.

### **Limites de l'approche**

Pour une discussion approfondie des limites de l'approche, veuillez vous référer à Coulon et coll. (2022). Il est cependant important de mentionner ici les principales limitations de la démarche d'optimisation développée :

- L'approche développée ne considère pas les incertitudes conceptuelles associées au développement des modèles numériques, qui se veulent une simplification d'une réalité complexe. Les simplifications considérées (conditions frontières constantes, atteinte d'un régime permanent, discrétisation spatiale et temporelle, distribution spatiale des paramètres, écoulements verticaux négligés) sont toutes susceptibles de fournir une représentation erronée de la réalité. Il est cependant difficile de quantifier ce type d'incertitude.
- L'utilisation d'un modèle à interface abrupte jumelé à des corrections approximatives pour estimer le contour de salinité de 1 ‰ imprègne nécessairement d'erreur les contraintes d'optimisation et l'incertitude y étant associée. La correction de l'élévation du contour de salinité de 50 ‰ liée au maillage pourrait être évitée si la discrétisation autour des puits de pompage était suffisamment raffinée. Cependant, MODFLOW-2005 ne permettait pas l'option de raffiner la discrétisation localement. La correction pour la dispersion de la salinité, en plus d'être approximative, introduit deux nouveaux paramètres (la largeur initiale de la zone de transition  $M$  et la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$ ). En plus d'ajouter de l'incertitude se propageant aux contraintes d'optimisation, la définition de ces paramètres n'est pas triviale. La largeur de la zone de transition dépend grandement du site étudié et n'est pas nécessairement constante au sein de la zone d'intérêt. La dispersivité longitudinale est difficile à estimer puisqu'elle n'est pas directement mesurable. Des approches empiriques existent pour en faire l'estimation à partir de l'échelle de transport, mais ces approches ne sont pas toujours applicables aux modèles d'écoulement régionaux, où les échelles de transport sont considérables. Une dispersivité longitudinale de l'ordre de quelques mètres au maximum semble plus appropriée (Coulon et coll., 2022). De plus, la correction de dispersion ne sera pas appropriée pour un aquifère verticalement hétérogène (ou anisotrope) ou pour des unités géologiques de faibles conductivités hydrauliques (où la dispersion de la salinité par diffusion n'est pas négligeable). La correction de dispersion suppose aussi que l'écoulement se fait uniquement de façon verticale sous un puits de pompage, l'intrusion latérale d'eau salée n'est donc pas considérée. Cette hypothèse n'est pas appropriée pour des puits situés près de la côte, où l'intrusion latérale d'eau salée ne doit pas être négligée.
- Les hypothèses de linéarité nécessaires à l'utilisation de l'algorithme SLP sont restrictives et peuvent ne pas être pleinement satisfaites en fonction de la complexité du modèle numérique d'écoulement.

## **Annexe 13 : Méthodologie pour l'analyse des propriétés hydrauliques**

La base de données hydrogéologiques du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* contient des données des propriétés hydrauliques suivantes : la conductivité hydraulique ( $K$ ), la transmissivité ( $T$ ), le coefficient d'emmagasinement ( $S$ ), l'emmagasinement spécifique ( $S_s$ ) et la capacité spécifique ( $C_{sp}$ ). Ces données proviennent des essais de perméabilité effectués dans les puits visités par l'Université Laval (Section 4.2.2), ainsi que de plusieurs rapports d'étude consultés pour lesquelles des résultats d'analyse d'essais hydrauliques étaient disponibles. À partir de ces informations, une nouvelle base de données de travail a été créée pour réaliser l'analyse statistique des propriétés hydrauliques des différentes unités géologiques.

Une grande majorité des mesures de conductivité hydraulique et d'emmagasinement spécifique proviennent d'essais de perméabilité multi-niveaux, réalisés dans quelques puits dans le cadre du portrait des ressources en eau souterraine ou lors d'études antérieures, à différentes profondeurs dans les puits (Section 4.2.2.1). Pour chacun de ces essais, une seule valeur moyenne de propriété hydraulique pour le puits a été retenue. La même logique a été appliquée lorsque plusieurs mesures provenaient d'un même essai de pompage, décrit dans le même rapport d'étude. Par contre, lorsque plusieurs mesures pour le même puits étaient disponibles et provenaient d'essais de pompage distincts décrits dans différents rapports d'étude, elles étaient conservées sans les moyenner.

Un effort particulier a été consacré à la transformation des données de transmissivité en conductivités hydrauliques, lorsque ces dernières n'étaient pas disponibles, pour les raisons suivantes :

1. Puisque la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine nécessite la connaissance de la variation spatiale de la conductivité hydraulique, le plus grand nombre de points de mesure possible est à privilégier.
2. Les données de transmissivité proviennent de différents essais hydrauliques où les profondeurs sondées dans les puits varient grandement. Les transmissivités obtenues par ces essais sont liées aux dimensions et aux caractéristiques des puits (profondeur totale et intervalle crépiné), et sont calculées pour l'épaisseur de l'aquifère exploité par le puits, au lieu d'être calculé pour l'épaisseur saturée complète de l'aquifère. Les données de transmissivité ne sont donc pas nécessairement comparables entre elles en fonction de la localisation où les essais ont été effectués. Des conductivités hydrauliques obtenues à partir des données de transmissivité sont quant à elles davantage appropriées pour l'étude de la variation spatiale de la capacité des aquifères à permettre l'écoulement.

La conductivité hydraulique peut se calculer en divisant la transmissivité obtenue à l'aide d'un essai de perméabilité par l'épaisseur saturée sondée lors de cet essai ( $K = T/b$ ). Lorsque l'information disponible le permettait, l'épaisseur saturée sondée a été calculée à l'aide de la profondeur du puits, de l'intervalle ouvert ou crépiné de celui-ci, et du niveau d'eau lors de l'essai. Cependant, certains rapports rapportant les essais hydrauliques ne fournissaient pas tous ces détails et omettaient certaines valeurs nécessaires au calcul de l'épaisseur saturée. Dans ces cas particuliers, l'épaisseur saturée sondée a été estimée avec l'information disponible (longueur crépinée, profondeur du forage, caractéristiques de puits voisins). Dans le cas où aucune information disponible ne permettait la transformation de la transmissivité en conductivité hydraulique, la mesure de transmissivité était simplement ignorée pour la base de données de travail.

Les capacités spécifiques correspondent au débit de pompage par unité de rabattement. Comme il s'agit d'une propriété combinée d'un puits et de la formation aquifère, elle ne peut pas représenter les caractéristiques intrinsèques de cet aquifère. Elles n'ont donc pas été retenues par les analyses ultérieures.

Au final, la base de données de travail à partir de laquelle les analyses statistiques ont été réalisées contient 434 mesures provenant de 197 points de mesure, et concerne la conductivité hydraulique, le coefficient d'emmagasinement et l'emmagasinement spécifique. Le nombre de mesures et de points de mesures pour chaque unité géologique est présenté à la Figure A.94.

Parmi les 197 points de mesure de la base de données de travail, on compte 21 mesures de conductivité hydraulique provenant d'analyses granulométriques qui ne sont pas compilées dans la base de données hydrogéologiques et qui ne sont pas associées à un puits ou à une localisation. Ces données proviennent de graphiques du pourcentage passant en fonction du diamètre en phi ( $\Phi$ ) d'échantillons de grès des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord récoltés par Brisebois (1981). Le programme HydrogeoSieveXL (Devlin, 2014) a ensuite été utilisé dans le cadre de l'étude actuelle pour calculer la moyenne de la conductivité hydraulique estimée à l'aide de 15 méthodes différentes.

Il est important de mentionner que, pour les besoins du projet, notamment les travaux de modélisation, l'analyse statistique des propriétés hydrauliques qui suit s'est effectuée avant la complétion finale de la base de données hydrogéologiques, qui s'est régulièrement mise à jour jusqu'à la toute fin du projet. Ainsi, quelques données de propriétés hydrauliques contenues dans la base de données hydrogéologiques ne se retrouvent pas dans la nouvelle base de données de travail dû à leur compilation tardive.

Pour ne pas accorder un poids statistique supérieur aux puits pour lesquels il existe plus d'une mesure d'une propriété hydraulique (ex. : obtenues à des profondeurs ou d'essais hydrauliques différents), une moyenne a été calculée et attribuée à chacun des 197 points de mesure de la base de données de travail. Les diagrammes en boîte de la Figure A.95 offrent un aperçu de la dispersion des propriétés hydrauliques pour chaque unité géologique. On observe que la dispersion des données n'est pas symétrique autour de la médiane et se rapproche plus d'une distribution asymétrique et positive telle une distribution log-normale. Ainsi, une fonction log-normale a été ajustée aux données afin d'en faire ressortir les moyennes et les écarts-types. Les résultats sont présentés au Tableau A.52, qui inclut notamment le nombre de données disponibles, la moyenne et l'écart-type des paramètres  $K$ ,  $S$ , et  $S_s$  pour chacune des unités géologiques. Ces statistiques sont utilisées dans le cadre de la modélisation des écoulements souterrains. Les distributions statistiques des logarithmes des propriétés hydrauliques de chaque unité géologique sont aussi présentées sous forme d'histogramme, pour chaque paramètre ci-dessus, respectivement aux Figure A.96, Figure A.97 et Figure A.98.

**Tableau A.52 : Statistiques des propriétés hydrauliques par unité géologique**

Propriété hydraulique		Unité géologique				
		Membre de l'Étang-des-Caps	Membre de l'Étang-du-Nord	Formation du Cap au Diable	Formation du Havre aux Maisons	Dépôts meubles chenalisés
Conductivité hydraulique ( $K$ ), en m/s	$n$	152	33	6	2	4
	$\mu(K)$	$5,95 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-5}$	$4,73 \times 10^{-6}$	$1,88 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-5}$
	$\mu(\log(K))$	-4,23	-4,71	-5,32	-3,73	-4,83
	$\sigma(\log(K))$	0,55	0,83	0,66	0,98	0,90
Emmagasinement ( $S$ ), en $m^3/m^3$	$n$	44	6	3	1	-
	$\mu(S)$	$1,42 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-3}$	$6,75 \times 10^{-4}$	$5,40 \times 10^{-3}$	-
	$\mu(\log(S))$	-2,85	-2,89	-3,17	-2,27	-
	$\sigma(\log(S))$	1,12	0,95	0,37	-	-
Emmagasinement spécifique ( $S_s$ ), en $m^{-1}$	$n$	9	1	2	-	-
	$\mu(S_s)$	$1,55 \times 10^{-5}$	$2,59 \times 10^{-6}$	$4,54 \times 10^{-6}$	-	-
	$\mu(\log(S_s))$	-4,81	-5,59	-5,34	-	-
	$\sigma(\log(S_s))$	1,00	-	1,20	-	-

$n$  = nombre de données dans l'échantillon ;  $\mu$  = moyenne ;  $\sigma$  = écart-type ;  $\log$  = logarithme base 10

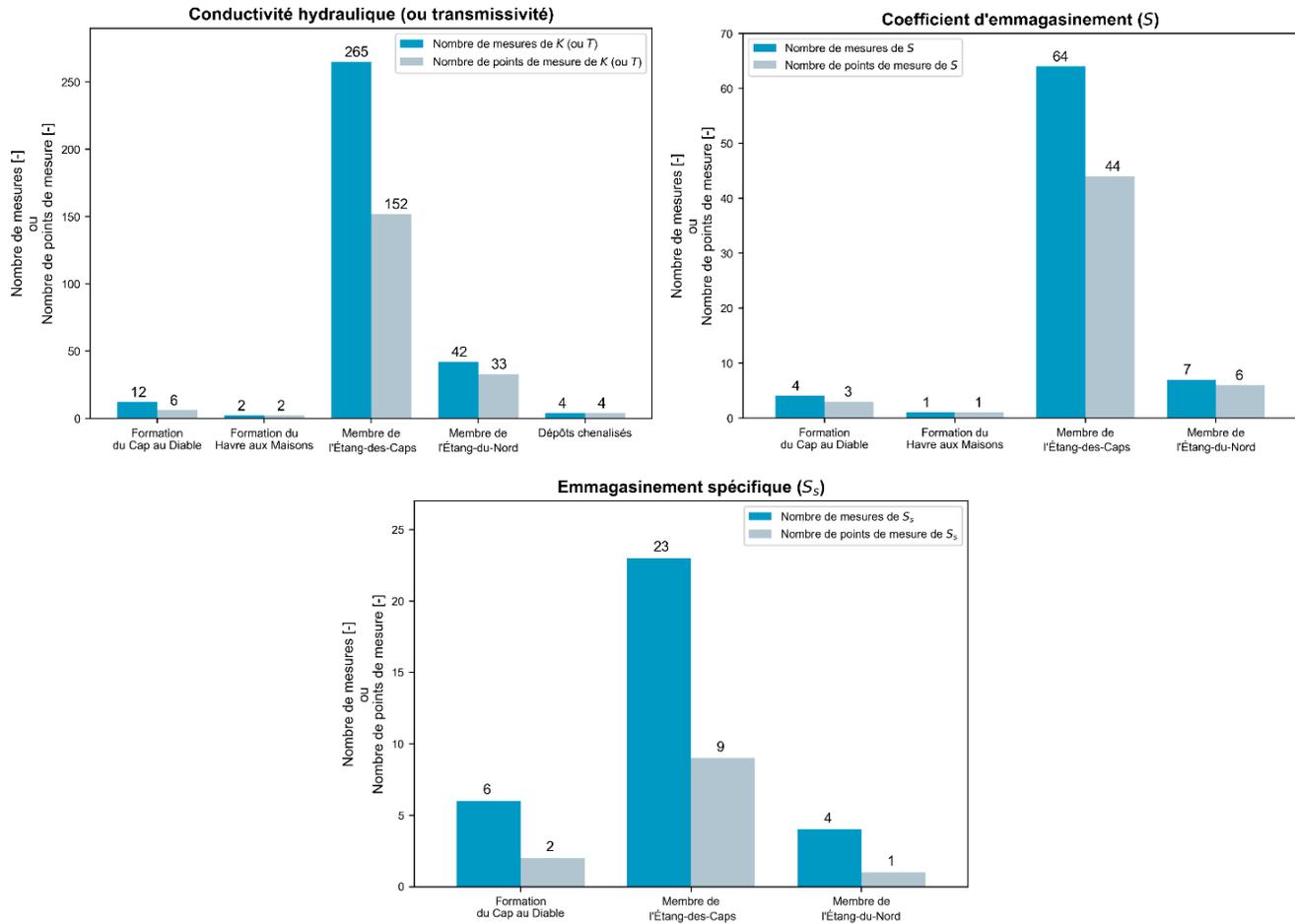


Figure A.94 : Nombre de mesures et nombre de points de mesure de  $K$  (ou  $T$ ),  $S$  et  $S_s$  par unité géologique

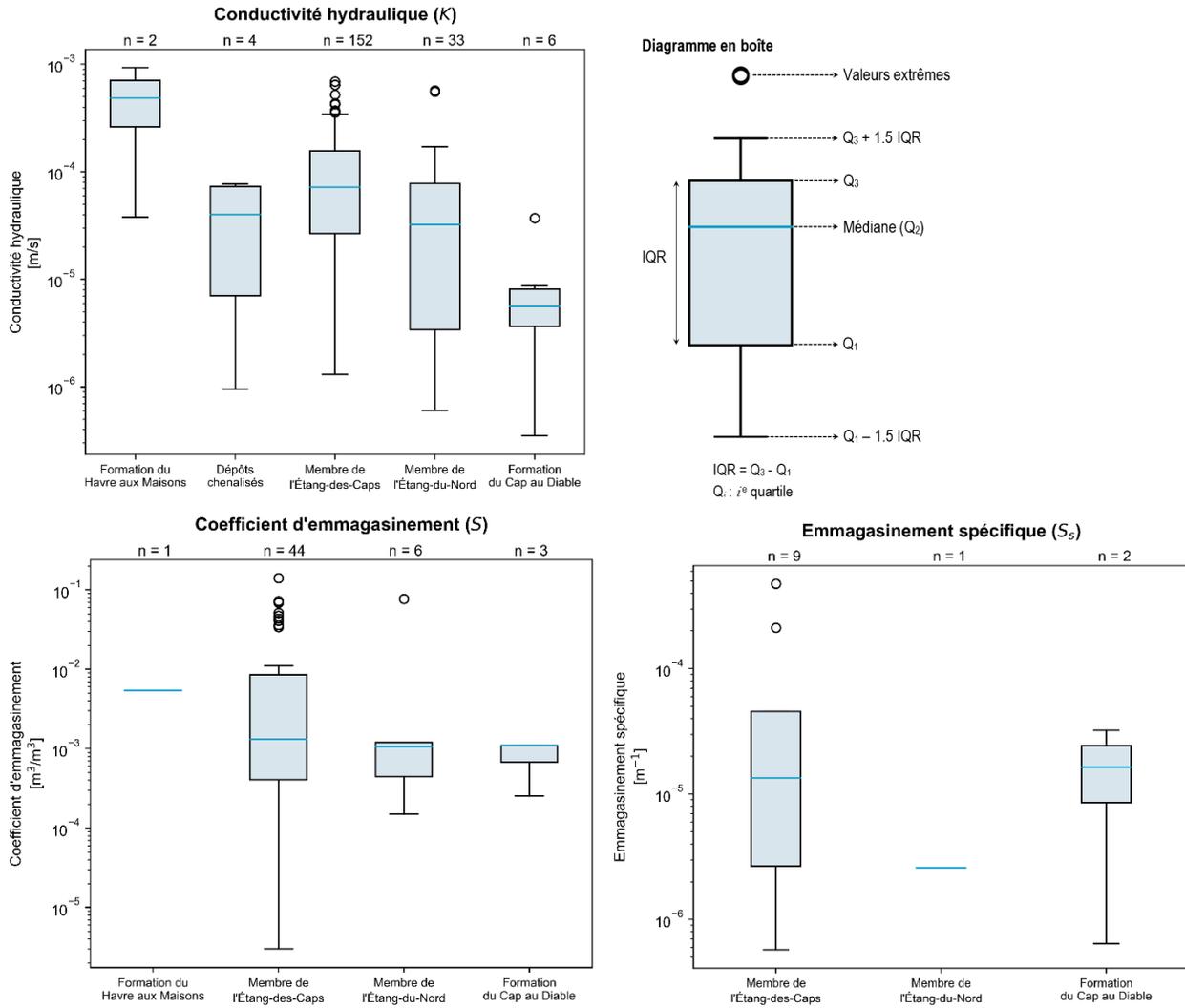


Figure A.95 : Diagrammes en boîte des conductivités hydrauliques, coefficients d'emmagasinement, et emmagasinsments spécifiques des différentes unités géologiques

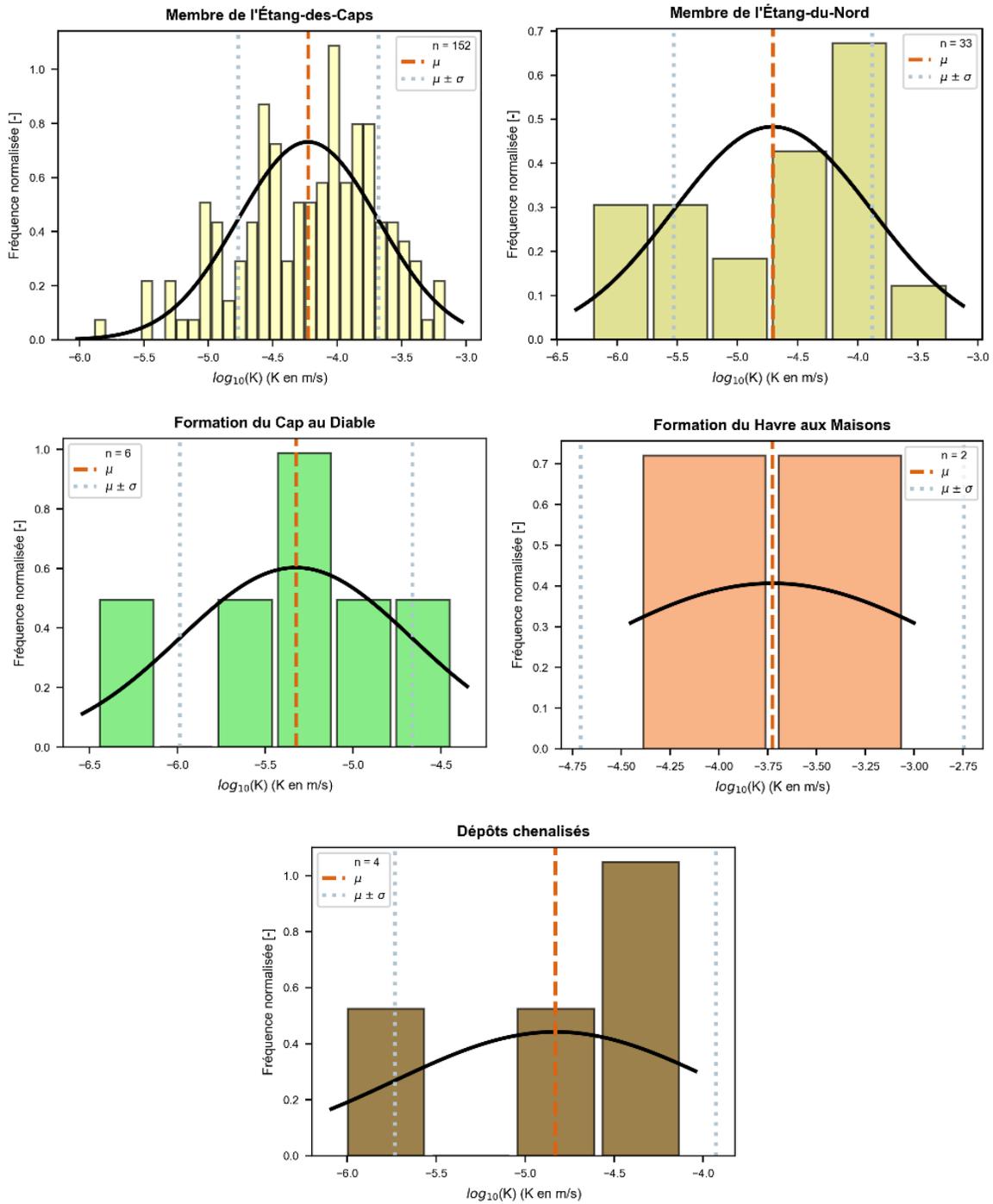


Figure A.96 : Histogramme du logarithme des conductivités hydrauliques de chaque unité géologique et fonction log-normale ajustée ( $n$ : nombre de données dans l'échantillon,  $\mu$  : moyenne,  $\sigma$  : écart-type)

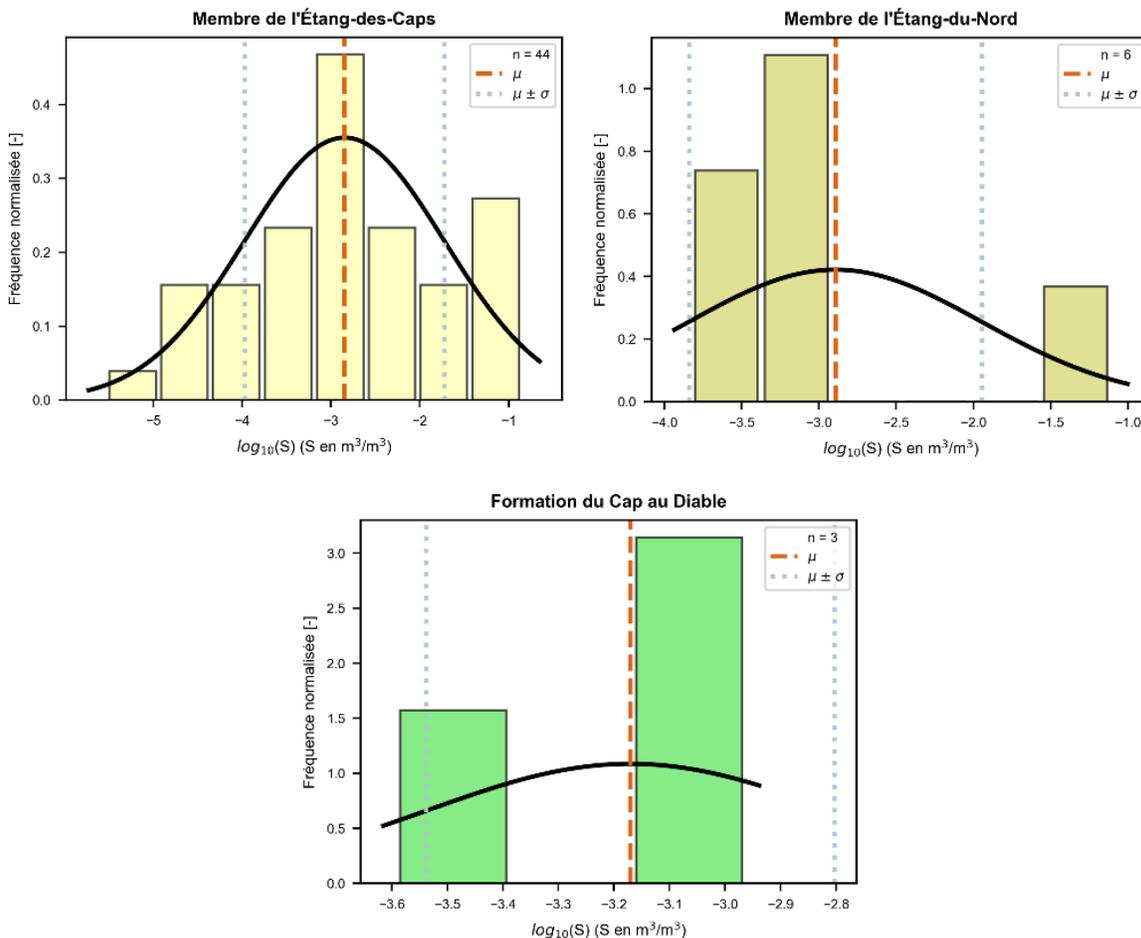
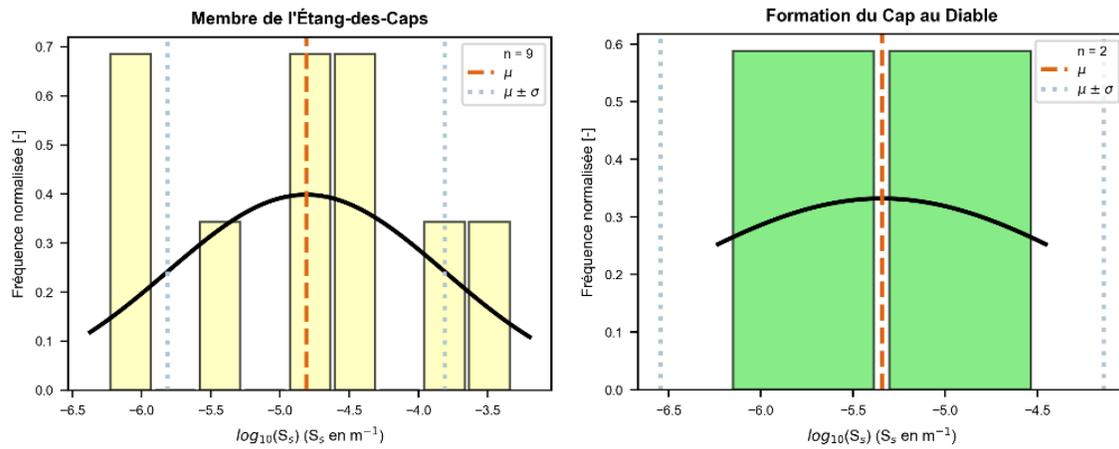


Figure A.97 : Histogramme du logarithme des coefficients d'emmagasinement de chaque unité géologique et fonction log-normale ajustée (n: nombre de données dans l'échantillon, μ : moyenne, σ : écart-type)



**Figure A.98 : Histogramme du logarithme des emmagasineurs spécifiques de chaque unité géologique et fonction log-normale ajustée (n: nombre de données dans l'échantillon,  $\mu$  : moyenne,  $\sigma$  : écart-type)**

**Annexe 14 : Méthodologie pour la validation des observations de niveau d'eau utilisées pour l'estimation la piézométrie**

La méthodologie pour estimer la piézométrie des îles principales rocheuses et habitées, à l'aide de la modélisation numérique, diffère du protocole des PACES intitulé *Protocole pour la préparation du Livrable 19 et 20 – Piézométrie dans les formations superficielles et dans le roc* (Lefebvre et coll., 2012). La présente annexe décrit la méthodologie employée pour valider les observations de niveau d'eau qui ont été intégrées aux processus de calibration des modèles.

### **Source des données**

Les profondeurs de l'eau mesurées dans les puits compilés dans la base de données hydrogéologiques ont constitué les données de base pour modéliser l'élévation de la charge hydraulique des îles de la Madeleine par rapport au niveau moyen local de la mer. Étant donné que la nappe est jugée libre partout sur le territoire, l'élévation de la charge correspond à l'élévation de la nappe.

Les données des puits concernés proviennent de sources diverses, dont le SIH, le RSESQ, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et de nombreux rapports d'étude. Plusieurs niveaux d'eau ont aussi été récoltés sur le terrain dans le cadre du projet par l'Université Laval.

Les élévations du MAN (Carte 5), le réseau hydrographique (Carte 7), la géologie du socle rocheux (Carte 16) et la géologie des formations superficielles (Carte 18) sont toutes des connaissances ayant permis de juger de la validité des données de base, de même que de la cohérence du résultat de la modélisation.

### **Validation des données**

Afin de modéliser les élévations piézométriques, il faut d'abord nettoyer la base de données en excluant les mesures problématiques. Ces problèmes peuvent être d'ordres divers, par exemple une mauvaise localisation, une incohérence dans un niveau d'eau statistique comparativement à un niveau d'eau dynamique, une erreur de mesure ou une estimation trop grossière de la profondeur de l'eau. Un processus rigoureux de validation des données a été mis en place pour sélectionner les données pertinentes à utiliser pour la modélisation.

La base de données hydrogéologiques contient des profondeurs d'eau, et non pas des élévations. Au terme du processus de validation, les profondeurs d'eau ont été transformées en élévation, simplement en soustrayant les profondeurs des élévations du sol du MAN (Carte 5).

La base de données hydrogéologiques contient 961 900 mesures de profondeur d'eau provenant de 729 puits distincts. Parmi ces mesures, 122 176 sont considérées comme étant représentatives d'un niveau statique, 836 963 comme étant représentatives d'un niveau dynamique et 31 étaient des niveaux à sec (égal ou plus profonds que la profondeur totale du puits). Le nombre de mesures est très élevé comparativement au nombre de puits, car la très grande part de ces mesures (99,8 %) proviennent de 35 puits ayant plus de 3 500 mesures correspondant à des chroniques horaires ou journalières s'étendant sur plusieurs années.

### **Préparation des données**

Le repère par rapport auquel les profondeurs d'eau de la base de données hydrogéologiques sont présentées est variable. Il peut s'agir de profondeurs par rapport au niveau du sol, par rapport au tubage, ou de repère inconnu. Pour les étapes de validation ultérieures, les profondeurs devaient être ramenées

par rapport au sol. Pour ce faire, lorsque le repère correspondait au tubage, et que la hauteur du tubage au-dessus du sol du puits était connue, cette hauteur était déduite de la profondeur de l'eau. Dans le cas où la hauteur du tubage était inconnue, une hauteur de tubage moyenne de 0,5 m, calculée de tous les puits des îles de la Madeleine, a été utilisée. Lorsque le repère était inconnu, il a été assumé que la profondeur rapportée était par rapport au tubage, comme c'est souvent le cas dans les rapports d'étude hydrogéologique.

Le Tableau A.53 et le Tableau A.54 montrent respectivement les statistiques des mesures des profondeurs d'eau et les statistiques des dates de mesures, le tout avant, pendant et après le processus de validation.

**Tableau A.53 : Statistiques des mesures des profondeurs d'eau avant, pendant et après le processus de validation**

Paramètre	Données brutes	Après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques	Après la sélection d'une seule mesure par puits	Données validées
Nombre	961 900	62 622	313	234
Minimum	-0,5	-0,3	0,3	0,3
1 <sup>er</sup> quartile	11,1	3,1	5,7	5,1
Médiane	14,4	6,1	11,5	10,4
3 <sup>e</sup> quartile	22,5	14,6	14,9	14,2
Maximum	47,0	37,9	37,9	37,9
Moyenne	15,7	8,2	11,4	10,5
Écart-type	8,1	5,9	6,8	6,9

**Tableau A.54 : Statistiques des dates de mesure des profondeurs d'eau avant, pendant et après le processus de validation**

Paramètre	Données brutes	Après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques	Après la sélection d'une seule mesure par puits	Données validées
Nombre de mesure avant 2000	41 787	28 049	75	26
Nombre de mesure à partir de 2000	920 113	34 573	238	208
Minimum	1963	1968	1968	1968
1 <sup>er</sup> quartile	2014	1985	2003	2009
Médiane	2016	2015	2012	2013
3 <sup>e</sup> quartile	2017	2020	2016	2016
Maximum	2020	2020	2020	2020
Moyenne	2015	2003	2007	2010

### **Critères de validation de la base de données hydrogéologiques**

La base de données hydrogéologiques contient des cotes de fiabilité et des critères de validation, tel que décrit dans le protocole des PACES intitulé *Protocole de fiabilité et validation des données de forage* (Lambert et coll., 2010). Les cotes de fiabilité ont pour objectif d'évaluer le degré d'incertitude de la localisation, la provenance et la qualité de l'information, et ce en considérant uniquement la méthode utilisée pour obtenir l'information, sans égard à la valeur de l'information. Les critères de validation ont pour objectif de juger de l'exactitude de l'information, quel que soit son niveau de fiabilité. Les puits et les mesures de niveau d'eau qui répondaient aux critères suivants ont été rejetés :

- *FS1 – Provenance de l'information* : Les données issues du SIH, car les mesures de niveau d'eau y sont souvent estimées visuellement par les puisatiers et sont ainsi peu fiables;
- *VL1 – Cohérence de la localisation avec le réseau hydrographique* : Conflit spatial avec le réseau hydrographique (à l'intérieur d'un polygone du réseau hydrographique de la Carte 7), à plus de 10 m de la rive;
- *VL2 – Cohérence de la profondeur au roc identifiée en forage avec la cartographie des zones d'affleurement et de till mince* : Le puits est situé dans un polygone d'affleurement ou de till mince de la carte de la géologie des formations superficielles (Carte 18), et montre une épaisseur de dépôts meubles supérieure à 10 m;
- *VT4 – Cohérence de la profondeur des niveaux d'eau* :
  - o Le niveau d'eau est dynamique;
  - o Le niveau d'eau est plus profond que la profondeur totale du puits;
  - o Le niveau d'eau statique est plus profond qu'un niveau d'eau dynamique du même puits.

Parmi les 961 900 mesures initiales, 955 638 ont été écartées, en grande majorité parce qu'il s'agissait de niveaux d'eau dynamiques, laissant 62 622 mesures de niveau d'eau statique pour les étapes de validation ultérieures. Les statistiques du Tableau A.53 montrent clairement que les niveaux d'eau de l'échantillon excluant les niveaux dynamiques sont moins profonds.

### **Sélection d'un seul niveau d'eau par puits**

Dans le but de réaliser la validation des données aux étapes suivantes, un seul niveau d'eau par puits doit être retenu. Les critères suivants, appliqués de manière subséquente, ont été utilisés pour sélectionner la mesure la plus représentative de l'état de la nappe actuelle :

- Exclusion des mesures déviant de plus de 3 m de la moyenne des profondeurs d'eau du même puits. Ce critère correspond approximativement à la somme de la variation saisonnière maximale de 2,5 m observée depuis les puits du RSESQ (Figure 8.9 de la Section 8.3.1.4) et l'erreur potentielle due à la déduction d'une hauteur de tubage moyenne de 0,5 m;
- Priorisation des mesures depuis les années 2000;
- Priorisation des mesures dont les paramètres État, Représentativité et Pompagement dans la base de données hydrogéologiques sont connus;
- Priorisation de la date la plus récente.

Au terme de cette étape, il est resté 313 mesures de niveau d'eau dans autant de puits distincts. Les statistiques de ces mesures sont montrées au Tableau A.53.

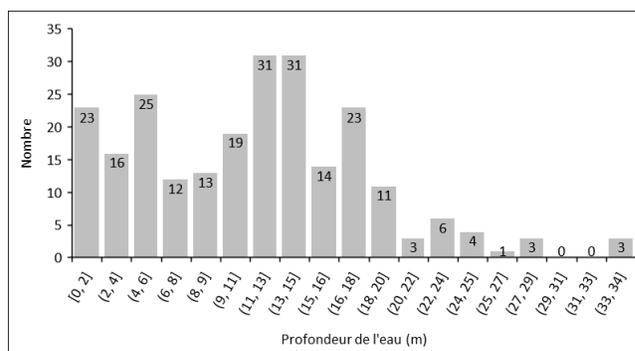
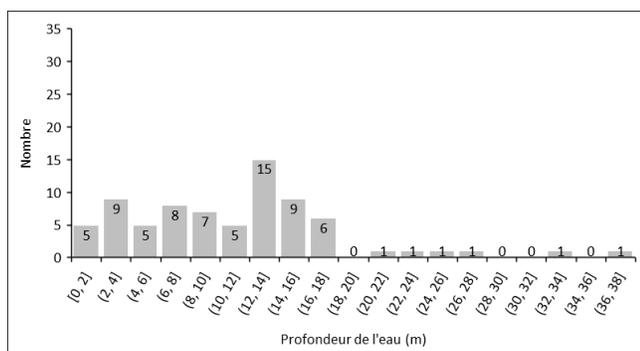
**Utilisation des anciennes mesures**

La pertinence de conserver les plus vieilles mesures de niveau d'eau a été investiguée. Il peut être hasardeux d'employer des niveaux d'eau qui ne seraient plus représentatifs de l'état de la nappe actuelle pour modéliser la piézométrie d'aujourd'hui. Les mesures de niveau d'eau des 313 puits sélectionnés à l'étape précédente ont été séparées selon leur date de mesure, soit celles datant d'avant 2000 et celles datant d'à partir de 2000. Le Tableau A.55 et la Figure A.99 montrent les statistiques et les distributions très semblables des deux sous-échantillons, ce qui justifie de conserver les données les plus anciennes pour modéliser la piézométrie actuelle.

Exceptionnellement, les vieilles mesures des secteurs de la centrale thermique d'Hydro-Québec à Cap-aux-Meules et de l'aéroport à Havre-aux-Maisons, qui ont une densité de puits très élevée, ont été retirées. Le nombre très élevé de mesures récentes dans ces secteurs est suffisant pour la modélisation. Les mesures d'avant 2004 ont été rejetées pour le secteur de la centrale (rejet de 35 puits sur 123) et celles d'avant 2000 ont été écartées pour l'aéroport (rejet de 6 puits sur 32). À noter que les statistiques du Tableau A.55 et l'histogramme de la Figure A.99 incluent ces données rejetées.

**Tableau A.55 : Statistiques des mesures des profondeurs d'eau, avant et après 2000, après la sélection d'une seule mesure par puits**

Paramètre	Avant 2000	À partir de 2000
Nombre	75	238
Minimum	0,4	0,3
1 <sup>er</sup> quartile	6,2	5,6
Médiane	11,9	11,5
3 <sup>e</sup> quartile	14,5	15,3
Maximum	37,9	34,4
Moyenne	11,3	11,4
Écart-type	7,0	6,8



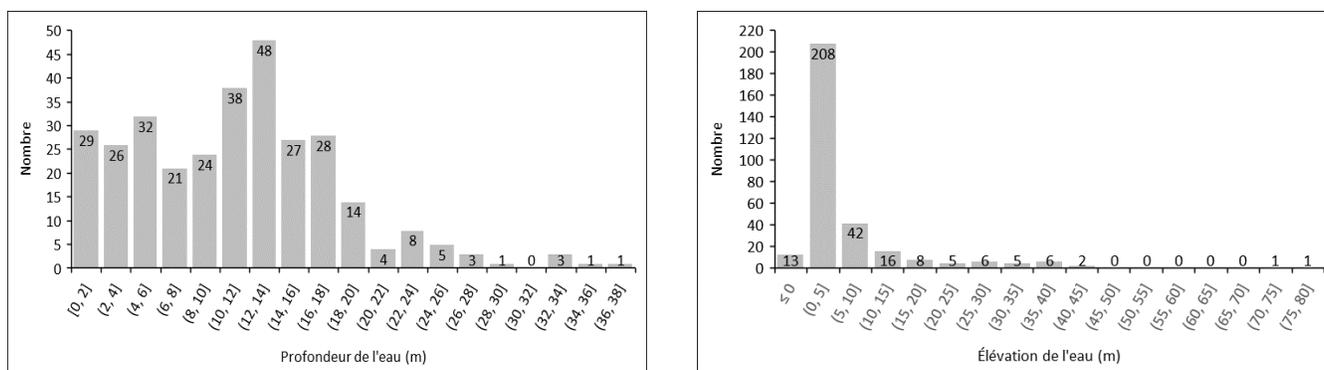
**Figure A.99 : Distribution des valeurs de profondeur de l'eau des 75 mesures datant d'avant 2000 (à gauche) et des 238 mesures datant d'après 2000 (à droite)**

### Valeurs aberrantes

L'analyse des statistiques du Tableau A.53 et de la distribution des valeurs de profondeur des 313 mesures sélectionnées, présentée à l'histogramme de la Figure A.100, a ensuite permis d'identifier quelques valeurs aberrantes. La distribution log-normale montre que 98,4 % des valeurs étaient inférieures à 30 m et que 91,7 % étaient inférieures à 20 m, ce qui correspondait respectivement à 5 et 26 mesures sur les 313 qui étaient à l'extérieur de ces seuils.

La distribution des élévations de la nappe, obtenues en soustrayant les profondeurs des puits par les élévations du sol du MAN (Carte 5), a aussi été analysée Figure A.100. La distribution log-normale a permis d'identifier 4 valeurs aberrantes supérieures à 40 m, seuil pour lequel 98,7 % des données étaient inférieures.

Les valeurs extrêmes identifiées n'ont pas été rejetées automatiquement, mais ont été vérifiées avec une attention soutenue lors des prochaines étapes de validation.



**Figure A.100 : Distribution des valeurs de profondeur (à gauche) et d'élévation (à droite) de l'eau des 313 puits restants après la sélection d'une seule mesure par puits**

### Filtration semi-automatique à l'aide d'une moyenne mobile

Une moyenne mobile a été employée pour identifier les valeurs de profondeur d'eau qui s'éloignaient significativement de celles des puits voisins. Cela signifie que ces puits étaient possiblement mal localisés. Pour le calcul de la moyenne mobile, un rayon de recherche de 250 m a été utilisé, et une densité minimale de 3 puits dans le rayon de recherche était nécessaire. Les valeurs s'éloignant de 3 m ou plus de la moyenne mobile ont été mises en évidence. Un écart-type mobile a aussi été calculé, avec un rayon de recherche de 250 m et une densité minimale de 5 puits, ce qui a permis d'identifier les puits dont les valeurs étaient supérieures à 2 fois l'écart-type local.

Tout comme les valeurs aberrantes de l'étape précédente, les mesures significativement différentes des puits voisins n'ont pas été rejetées automatiquement, mais ont été vérifiées avec une attention particulière lors des prochaines étapes de validation.

### Filtration visuelle

Étant donné le nombre peu élevé de puits comparativement aux autres régions des PACES au Québec, il a été possible de visualiser dans un SIG la localisation de chacun des 313 puits sélectionnés et de juger de la validité de leur valeur de profondeur d'eau. Pour émettre ce jugement professionnel, les valeurs des puits voisins ont été comparées, et la cohérence des profondeurs d'eau en lien avec les

connaissances hydrogéologiques du territoire d'étude, telles que les élévations du MAN (Carte 5), la géologie du socle rocheux (Carte 16), et la géologie des formations superficielles (Carte 18) a été analysée.

Le choix de conserver ou rejeter un forage s'est appuyé sur les critères suivants :

- La localisation près de la mer : Les profondeurs d'eau (et les élévations) devaient être près de 0 m lorsque le puits était situé près de la côte, sauf dans le cas où il y avait des falaises.
- La localisation dans la mer, sur une large plage ou sur une île : Les puits prétendument situés sur de larges plages ou dans la mer sont potentiellement mal localisés et ont été retirés si leur profondeur était significativement différente de leurs voisins. Les puits situés sur des îles marginales, qui ne sont pas d'intérêt pour la modélisation de la piézométrie des îles rocheuses principales et habitées, ont aussi été écartés.
- La cohérence avec la topographie : Les profondeurs d'eau sont normalement plus élevées sur le sommet des collines que sur les pentes des collines, qui sont à leur tour normalement plus élevées que sur les plateaux de grès, où des résurgences pourraient avoir lieu.
- Les niveaux d'eau mesurés dans les puits municipaux en pompage : Les profondeurs d'eau dans les puits municipaux ont été évaluées avec attention, car il est possible qu'elles aient été obtenues alors que le puits était en pompage, mais qu'elles n'aient pas été considérées comme dynamiques selon les critères de validation de la base de données hydrogéologiques.
- L'influence des puits de pompage municipaux : Les profondeurs d'eau dans les puits à proximité des puits municipaux ont aussi été évaluées avec attention, car il est possible qu'elles étaient influencées par le pompage lors de leur obtention, mais qu'elles n'aient pas été considérées comme dynamiques selon les critères de validation de la base de données hydrogéologiques.
- La cohérence de l'adresse : Pour certains puits issus du SIH, l'adresse était disponible. Celle-ci a été comparée avec celle du lot, tel qu'indiqué par la matrice graphique de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, correspondant aux coordonnées géographiques du puits. Quelques puits mal localisés ont ainsi été identifiés.
- Les élévations de la nappe plus faibles que le niveau moyen local de la mer : Ces niveaux d'eau ont été rejetés, sinon cela signifierait que le gradient hydraulique se dirige de la mer vers les terres. Une marge d'erreur sur la mesure de 0,7 m a été utilisée, signifiant que les élévations inférieures à -0,7 m étaient rejetées alors que celles supérieures à ce seuil étaient conservées. Cette marge d'erreur provient de la somme des erreurs suivantes :
  - o erreur potentielle due à la déduction d'une hauteur de tubage moyenne de 0,5 m;
  - o erreur reliée à l'imprécision du niveau moyen de la mer de 0,2 m (niveau moyen local supérieur au niveau moyen géodésique de 0,168 m + effet de la marée maximal observé dans les puits de 0,025 m (Section 8.3.1.5))

La filtration visuelle s'est conclue avec le rejet de 79 puits, laissant un échantillon de 234 profondeurs d'eau validées à utiliser pour la modélisation de la piézométrie.

Les statistiques des valeurs de profondeurs d'eau des puits validés sont montrées respectivement au Tableau A.53, et leur distribution est présentée à l'histogramme de la Figure A.101. La moyenne et les quartiles démontrent que les profondeurs d'eau validées sont moins profondes que celles après la sélection d'une seule mesure par puits. Des 26 valeurs supérieures à 20 m jugées précédemment

potentiellement aberrantes, il n'en reste plus que 13. Ces puits se situent sur les buttes au centre des îles du Cap aux Meules de Grosse Île et de la Grande Entrée.

Les statistiques des dates de mesure des puits validés sont montrées au Tableau A.54, et les histogrammes annuels et mensuels sont présentés à la Figure A.102. Les mesures des données validées semblent généralement plus récentes que celles après la sélection d'une seule mesure par puits. Environ 70 % des mesures proviennent de l'année 2012 et après. Ceci implique que davantage de données anciennes ont été rejetées comparativement aux données les plus récentes. Une forte concentration des mesures a été récoltée à l'automne, avec près de 40 % des données mesurées durant le mois de novembre.

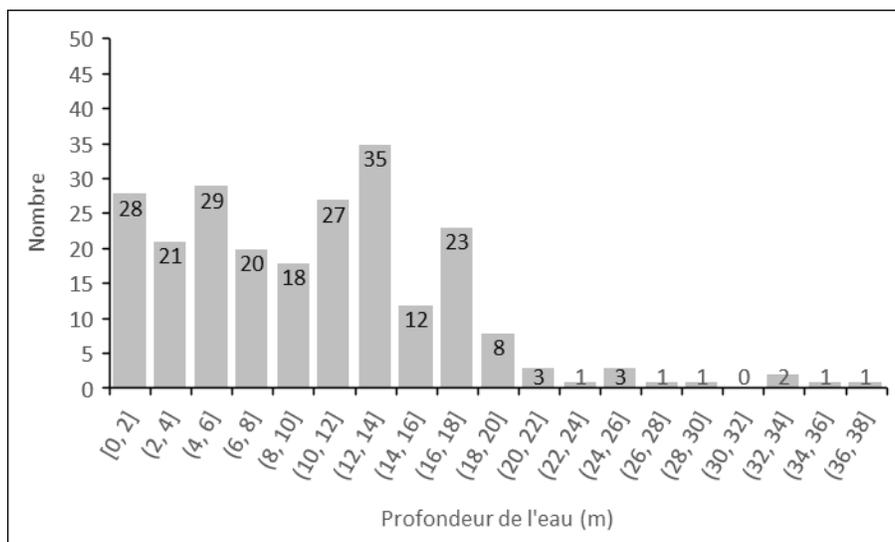


Figure A.101 : Distribution des valeurs de profondeur de l'eau des 234 puits validés

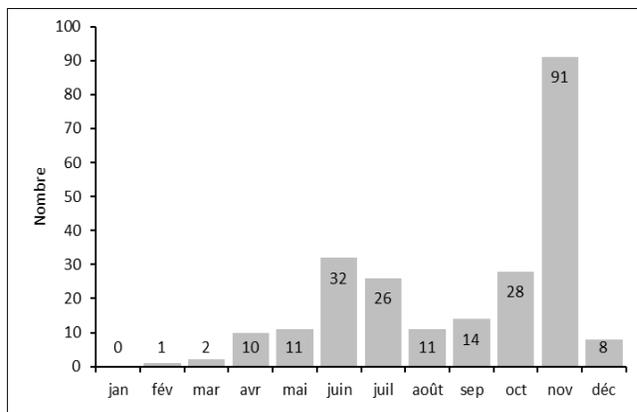
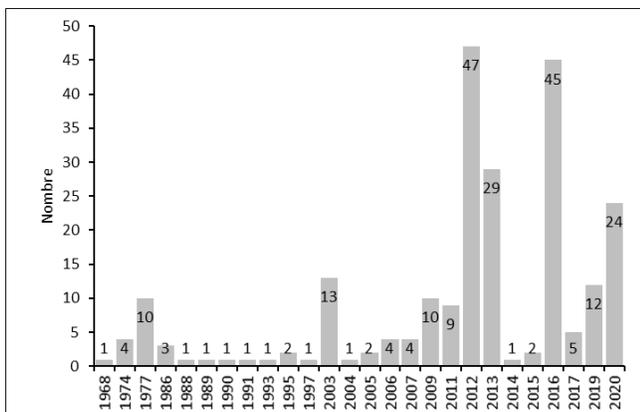


Figure A.102 : Distribution annuelle (à gauche) et mensuelle (à droite) des valeurs de profondeur de l'eau des 234 puits validés

### **Ajout des données moins fiables du SIH**

Les informations du SIH proviennent des rapports de forage que les puisatiers ont l'obligation de remplir et de transmettre au MELCC. Puisque l'utilisation d'un instrument de mesure n'est pas exigée, le niveau d'eau dans le puits est souvent estimé « à l'œil » par le foreur, introduisant une erreur potentielle importante. De plus, cette estimation est habituellement réalisée immédiatement après la complétion du puits, alors que le niveau d'eau n'est pas stabilisé. Pour cette raison, les données de niveau d'eau issues du SIH ont été jugées « non représentatives » d'un niveau statique et ont été automatiquement rejetées à l'étape *Critères de validation de la base de données hydrogéologiques*.

Il a été démontré que l'utilisation des données du SIH peut contribuer à produire une carte piézométrique régionale satisfaisante, mais qu'un processus rigoureux de validation des données doit au préalable être effectué (Tremblay et coll., 2015). L'ajout des données issues du SIH a permis d'améliorer la distribution spatiale des mesures.

Le même processus de validation effectué pour les mesures « plus fiables » a été mis en place. Cette évaluation concerne 199 puits sur un total de 225 qui avaient des niveaux d'eau provenant du SIH. Parfois, il existe d'autres sources de données pour les mêmes puits. Les 26 autres puits avaient d'ailleurs des mesures issues d'autres sources de données plus fiables et ont été analysés lors des étapes de validation précédentes. Souvent, étant donné que les données du SIH étaient considérées comme dynamiques, les autres niveaux d'eau mesurés dans les mêmes puits, bien que considérés statiques, ne répondaient pas aux conditions de l'étape *Critères de validation de la base de données hydrogéologiques*, car leur niveau statique était plus profond qu'un niveau dynamique du même puits. Si on considérait les niveaux du SIH comme statique, cette dernière évaluation serait fautive.

Le processus de validation des 199 puits a permis de rejeter 67 puits, résultant en un échantillon « moins fiables » de 110 profondeurs d'eau validées. Tout comme l'échantillon « plus fiable », la moyenne et les quartiles démontrent que les profondeurs d'eau sont moins profondes au terme du processus de validation (Tableau A.56). Aussi, la distribution log-normale montre que quelques valeurs extrêmes supérieures à 20 m ont été jugées valides (Figure A.103). Toutefois, contrairement à l'échantillon « plus fiable », le processus de validation ne semble avoir eu que très peu d'effet sur les dates des mesures (Tableau A.57). Environ 95 % des mesures du SIH validées proviennent d'avant 2000, dont 70 % des mesures récoltées durant l'année 1970 (Figure A.104). Tout comme les données « plus fiables », une forte concentration des mesures provient de l'automne, avec près de 60 % des données mesurées durant le mois de novembre (Figure A.104).

Les 110 mesures du SIH validées et jugées « moins fiables » ont été ajoutées aux 234 mesures « plus fiables » afin de produire un échantillon de 344 puits disponibles pour la modélisation.

**Tableau A.56 : Statistiques des mesures des profondeurs d'eau du SIH avant, pendant et après le processus de validation**

Paramètre	Données brutes	Après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques	Après la sélection d'une seule mesure par puits	Données validées
Nombre	258	232	177	110
Minimum	-0,1	-0,1	0,3	0,3
1 <sup>er</sup> quartile	4,9	4,5	4,3	3,7
Médiane	8,5	9,0	7,6	6,2
3 <sup>e</sup> quartile	14,3	14,3	14,0	12,7
Maximum	47,0	47,0	47,0	41,5
Moyenne	10,6	11,0	10,2	9,2
Écart-type	8,5	8,9	8,2	8,3

**Tableau A.57 : Statistiques des dates de mesure des profondeurs d'eau du SIH avant, pendant et après le processus de validation**

Paramètre	Données brutes	Après les critères de validation de la base de données hydrogéologiques	Après la sélection d'une seule mesure par puits	Données validées
Nombre de mesure avant 2000	220	205	150	104
Nombre de mesure à partir de 2000	38	27	27	6
Minimum	1966	1966	1966	1966
1 <sup>er</sup> quartile	1970	1970	1970	1970
Médiane	1973	1973	1970	1970
3 <sup>e</sup> quartile	1984	1984	1977	1973
Maximum	2014	2014	2014	2013
Moyenne	1980	1979	1978	1974

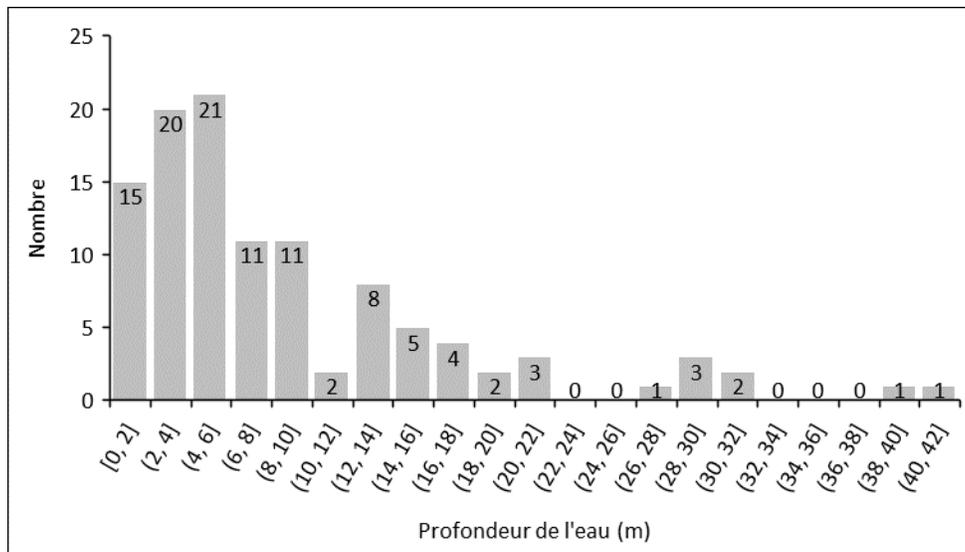


Figure A.103 : Distribution des valeurs de profondeur de l'eau du SIH des 110 puits validés

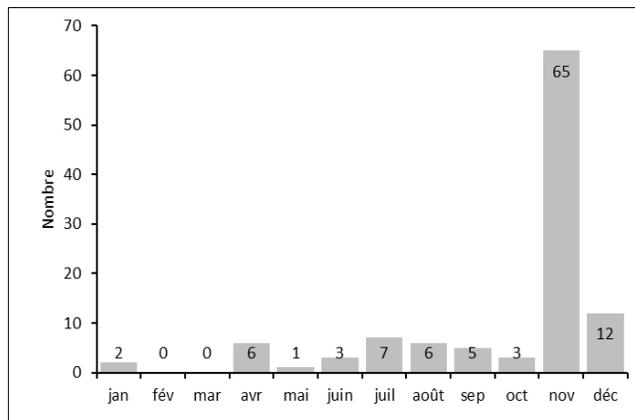
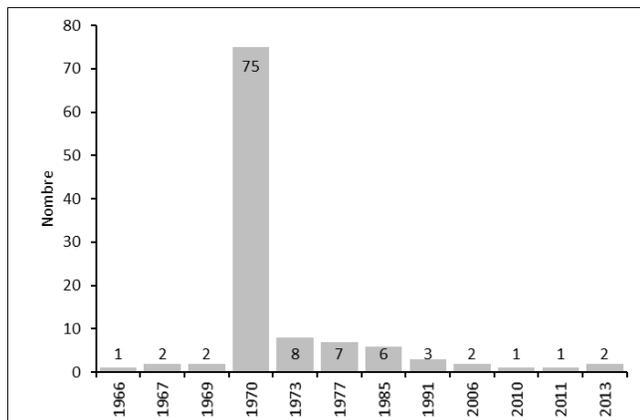


Figure A.104 : Distribution annuelle (à gauche) et mensuelle (à droite) des valeurs de profondeur de l'eau du SIH des 110 puits validés

## **Annexe 15 : Méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité de l'eau souterraine**

### **La méthode DRASTIC**

La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines des îles de la Madeleine a été évaluée à l'aide de la méthode DRASTIC (Aller et coll., 1987). Cette méthode est couramment utilisée, notamment en vertu du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) pour les aires d'alimentation des puits municipaux. Elle permet l'obtention d'un indice qui correspond à la sensibilité de l'eau souterraine à se voir affecter par une contamination provenant directement de la surface. L'acronyme anglophone DRASTIC réfère à chacun des sept paramètres hydrogéologiques et géologiques considérés par la méthode, tel qu'illustré à la Figure A.105. Un degré d'influence, ou poids, est attribué pour chaque paramètre pour le calcul de l'indice. La profondeur à la nappe et la nature de la zone vadose exercent le plus d'influence dans le calcul, alors que la pente du terrain en exerce le moins. Une cote variant de 1 à 10 pour chaque paramètre, selon des intervalles de valeur prédéfinis, doit être déterminée. Le Tableau A.58 présente la compilation des cotes, associées à leur intervalle de valeur, pour chacun des paramètres. Le calcul de l'indice DRASTIC correspond à la somme des cotes multipliées par leur poids. Les valeurs de l'indice peuvent varier de 23 à 226. Plus l'indice est élevé, plus la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine est élevée.

Afin d'interpréter adéquatement les résultats, il faut considérer les trois conditions d'application principales de la méthode DRASTIC suivantes :

1. Les sources de contamination se situent à la surface du sol (exclus les sources souterraines);
2. La nature du contaminant n'est pas prise en compte, mais il est supposé mobile dans le sol en phase dissoute et non réactif;
3. Les contaminants ne peuvent atteindre la nappe que par infiltration verticale (ne prends pas en compte l'écoulement souterrain horizontal).

La vulnérabilité de l'eau souterraine serait d'autant plus élevée que ce que la méthode DRASTIC suggère pour un contaminant libéré sous la surface du sol (ex. : oléoduc, réseau d'égout). La méthode n'est pas non plus applicable pour un contaminant qui ne serait pas en solution dans l'eau et ne circulerait donc pas à la même vitesse et selon les mêmes conditions (ex. : liquides non aqueux, comme certains solvants, pesticides et hydrocarbures). Enfin, certaines activités en amont pourraient libérer des contaminants qui atteindraient par écoulement souterrain horizontal la portion de l'aquifère considérée par le calcul de l'indice DRASTIC. Ainsi, un faible indice DRASTIC n'est pas garant d'un faible risque de contamination si un secteur en amont hydraulique est considéré comme vulnérable.

**Tableau A.58 : Cotes des paramètres pour le calcul de l'indice DRASTIC (tiré de MELCC, 2019)**

<b>Cote</b>	<b>D</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>I</b>	<b>C</b>
	<b>Profondeur à la nappe<sup>1</sup> (m)</b>	<b>Recharge (mm/an)</b>	<b>Nature du milieu aquifère (intervalle de cote)<sup>2</sup></b>	<b>Type du sol<sup>3</sup></b>	<b>Pente du terrain (%)</b>	<b>Nature de la zone vadose<sup>4</sup> (intervalle de cote)</b>	<b>Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/jour)</b>
1	31 et plus	0 à 50	-	Argile	18 et plus	Couche imperméable (1)	0,04 à 4
2	23 à 31	-	Shale massif (1-3)	Terre noire	-	-	4 à 12
3	15 à 23	50 à 100	Roches ignées ou métamorphiques (2-5)	Loam argileux	12 à 18	Silt ou argile (2-6) Shale (2-5)	-
4	-	-	Roches ignées ou métamorphiques altérées (3-5)	Loam silteux	-	Roches ignées ou métamorphiques (2-8)	12 à 29
5	9 à 15	-	Till (4-6)	Loam	6 à 12	-	-
6	-	100 à 180	Lits de grès, de calcaire et de shale (5-9) Grès massif (4-9) Calcaire massif (4-9)	Loam sableux	-	Calcaire (2-7) Grès (4-8) Lits de calcaire, de grès et de shale (4-8) Sable et gravier avec silt et argile (4-8)	29 à 41
7	4,5 à 9	-	-	Argile fissurée	-	-	-
8	-	180 à 250	Sable et gravier (4-9)	Tourbe	-	Sable et gravier (6-9)	41 à 82
9	1,5 à 4,5	250 et plus	Basalte (2-10)	Sable	2 à 6	Basalte (2-10)	-
10	0 à 1,5	-	Calcaire karstique (9-10)	Sol mince ou roc ou gravier	0 à 2	Calcaire karstique (8-10)	82 et plus

<sup>1</sup> En conditions de nappe captive, la profondeur à la nappe correspond au toit de l'aquifère.

<sup>2</sup> Chaque matériau est classé selon la cote type proposée par la méthode DRASTIC. Elle propose aussi un intervalle de cote, indiqué entre () dans ce tableau.

<sup>3</sup> Environ le premier mètre de dépôt à partir de la surface du sol.

<sup>4</sup> Portion souterraine entre la surface du sol et la surface libre de la nappe ou entre la surface du sol et le toit de l'aquifère dans le cas d'une nappe captive

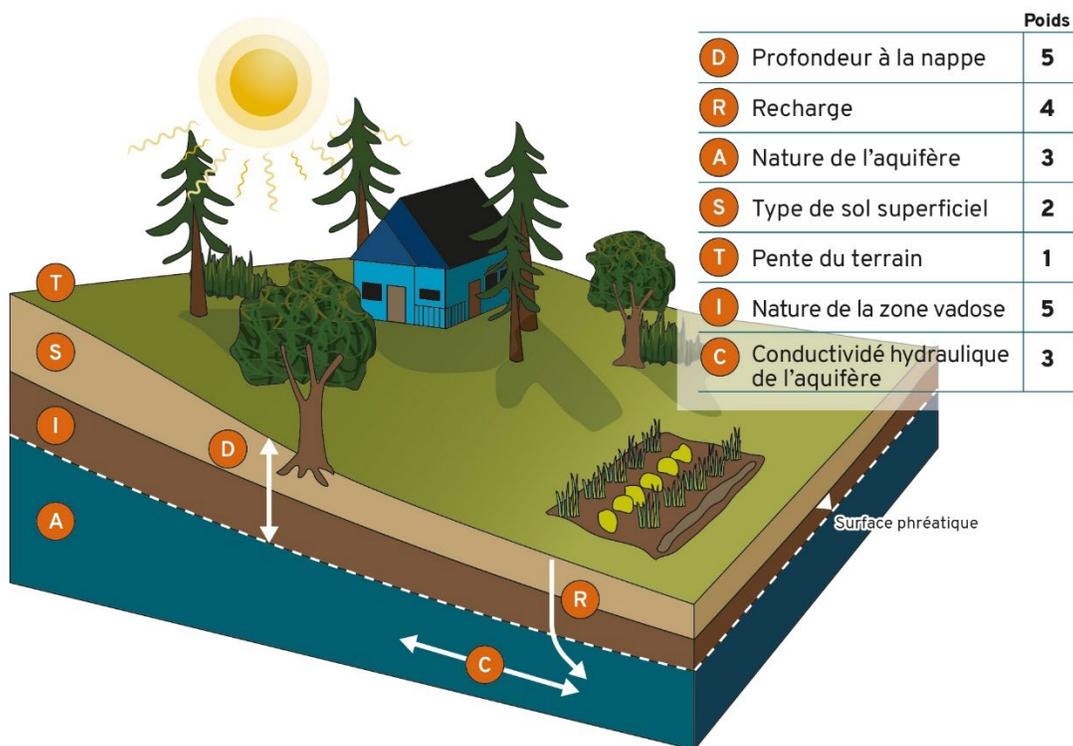


Figure A.105 : Schématisation de la méthode DRASTIC, basée sur sept paramètres hydrogéologiques et géologiques et leur poids respectif dans le calcul de l'indice (tiré de MELCC, 2019)

### Les résultats des paramètres de la méthode DRASTIC

Les méthodes d'obtention des cotes et les résultats pour chacun des sept paramètres de la méthode DRASTIC sont décrits et illustrés dans les sous-sections suivantes.

#### **D : Profondeur à la nappe**

Les cotes du paramètre D : Profondeur à la nappe s'appliquent directement à partir des élévations piézométriques de la Carte 23 : Profondeur à la nappe, en annexe électronique, (Section 8.3.1.3). Plus la surface libre de la nappe est près de la surface, plus un contaminant peut atteindre rapidement la nappe, et plus son potentiel d'atténuation est faible. La cote sera alors élevée, augmentant ainsi la vulnérabilité.

On retrouve toute la gamme des cotes possibles aux îles de la Madeleine, de 1 à 10. Globalement, les cotes les plus faibles, correspondant aux plus grandes profondeurs, se situent au niveau des buttes centrales des îles (Figure A.106). Les profondeurs diminuant radialement vers les côtes, les cotes s'accroissent en direction de la mer. Plus localement, des cotes élevées s'observent dans les vallées des cours d'eau, là où la nappe fait résurgence.

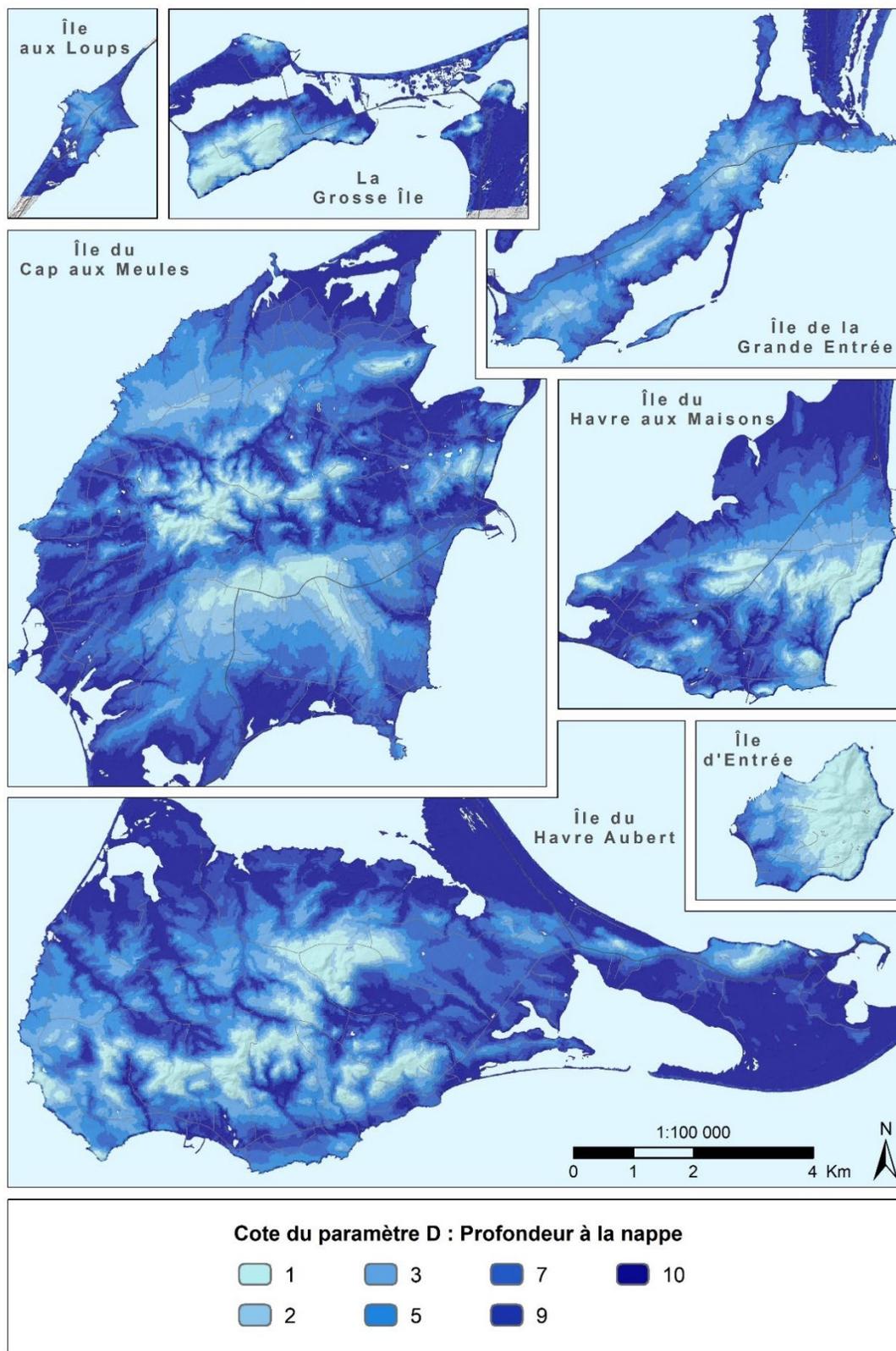


Figure A.106 : Cotes du paramètre D : Profondeur à la nappe de la méthode DRASTIC

***R : Recharge***

Les cotes du paramètre R : Recharge s'appliquent directement à partir de la recharge annuelle distribuée de la Carte 27 : Recharge, en annexe électronique (Section 8.4.3.1). Plus la recharge est élevée, plus la quantité d'eau pouvant mobiliser et transporter un contaminant vers la nappe est grande.

À l'exception de deux petits secteurs dans les villages de Cap-aux-Meules et de Grosse-Île, la recharge est supérieure à 250 mm/an partout sur les îles de la Madeleine, conférant la cote maximale de 9 sur 99,99 % du territoire modélisé (Figure A.107).

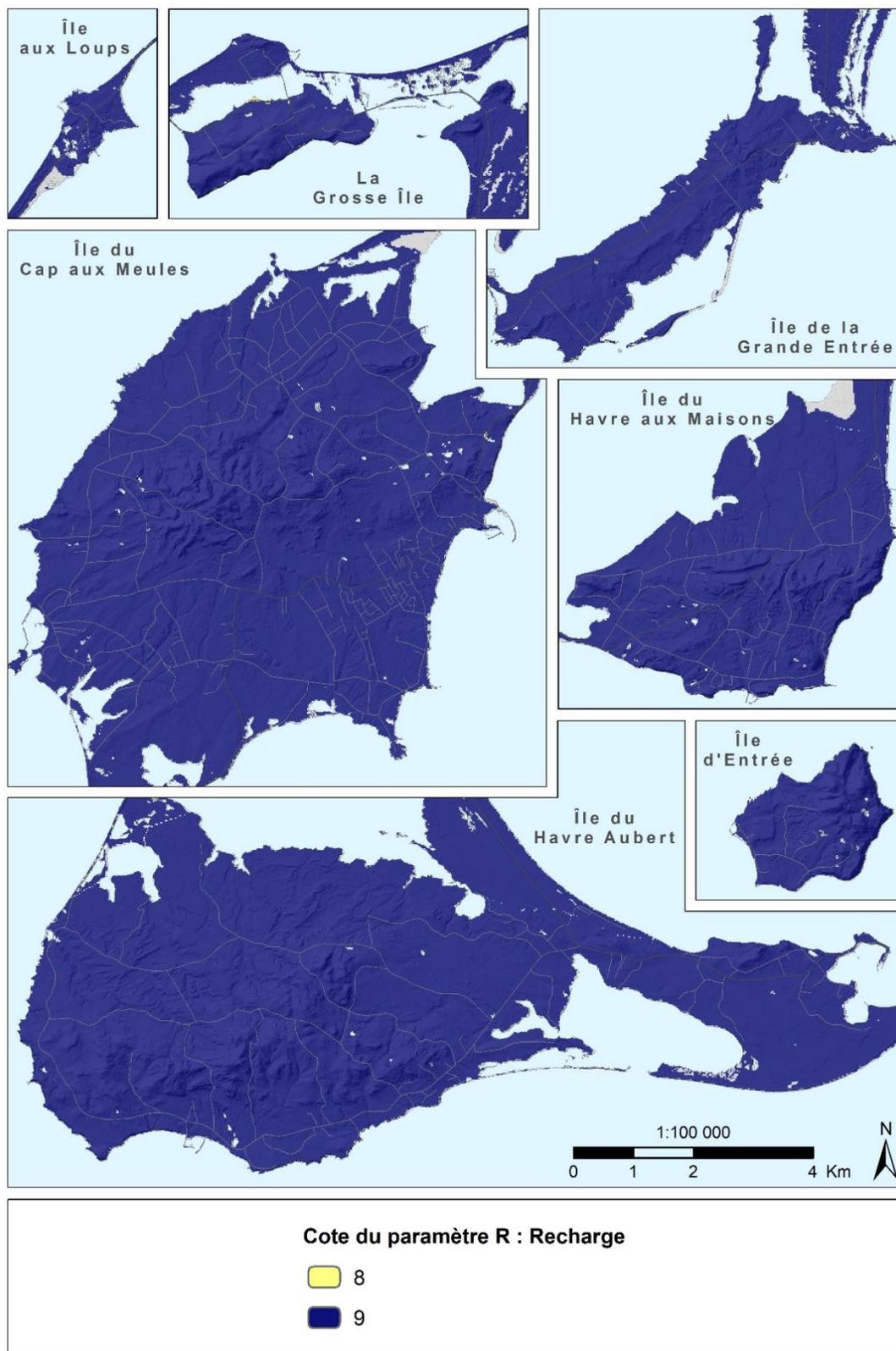


Figure A.107 : Cotes du paramètre R : Recharge de la méthode DRASTIC

### **A : Nature du milieu aquifère**

Les descriptions des matériaux composant les aquifères servent à sélectionner la cote A : Nature du milieu aquifère. Plus un matériau est perméable, plus le potentiel d'atténuation d'un contaminant dans l'aquifère est faible, et plus il peut circuler facilement et atteindre d'autres portions de l'aquifère. Les aquifères étant constitués principalement par le socle rocheux aux îles de la Madeleine, les lithologies de surface, montrées sur la Carte 16 : Géologie du socle rocheux et coupes géologiques, en annexe électronique, ont été considérées (Section 5.1.1.2). Puisque des intervalles de cote sont proposés par la méthode DRASTIC, les statistiques des propriétés hydrauliques mesurées (Section 8.1.1), notamment les moyennes des conductivités hydrauliques, ont servi à évaluer la perméabilité de chaque unité géologique, et ainsi attribuer la cote pour chaque milieu aquifère. Lorsque les mesures étaient en nombre insuffisant, les valeurs calibrées par la modélisation numérique ont été utilisées. Le Tableau A.59 décrit les lithologies des unités géologiques constituant les milieux aquifères et indique les cotes types retenues. La Figure A.108 montre ces cotes sur les îles principales.

Les grès du Membre de l'Étang-des-Caps sont les roches plus perméables. La méthode DRASTIC suggère une cote type de 6 pour des grès massifs avec un intervalle de cote pouvant aller de 4 à 9. Étant donné les connaissances établies sur la bonne perméabilité de ces roches, qui constituent d'ailleurs l'aquifère principal aux îles de la Madeleine, une cote de 7 a été retenue.

Les roches du Membre de l'Étang-du-Nord sont moins perméables que les précédentes, d'environ un demi-ordre de grandeur lorsqu'on considère les moyennes des conductivités hydrauliques. Outre les grès, elles sont constituées d'autres roches sédimentaires, comme des siltstones et des mudstones, qui font diminuer la perméabilité. La cote type de 6 pour un amalgame de lits de grès, de calcaire et de shale leur a été attribuée.

Les roches volcaniques de la Formation du Cap au Diable sont environ 10 fois moins perméables que les grès du Membre de l'Étang-des-Caps selon les moyennes des conductivités hydrauliques. La méthode DRASTIC propose une cote type de 8 pour le basalte, mais avec un très grand intervalle possible, soit de 2 à 10. Une cote inférieure aux unités géologiques précédentes de 5 a été retenue.

Les brèches d'effondrement constituant la Formation du Havre aux Maisons sont composées d'une variété de roches sédimentaires et volcaniques déformées, avec une domination de mudstones, une roche à grain fin typiquement peu perméable. Aucune cote type pour cet amalgame de roches n'est proposée par la méthode DRASTIC. Comme seulement deux mesures de conductivité hydraulique sont disponibles pour l'ensemble des îles de la Madeleine, elles ne peuvent être considérées comme représentatives. À défaut de plus de connaissances, la perméabilité est suspectée être similaire à celle de la Formation du Cap au Diable, et la même cote de 5 a été attribuée.

Les dépôts chenalisés, retrouvés principalement dans la vallée glaciaire sur l'île de la Grande Entrée, sont composés principalement de sable fin hétérogène. La moyenne des mesures de conductivité hydraulique d'environ  $1 \times 10^{-5}$  m/s est plus faible que celle des grès du Membre de l'Étang-des-Caps et similaire à celle des roches sédimentaires du Membre de l'Étang-du-Nord. La méthode DRASTIC propose une cote variant de 4 à 9 pour le sable et gravier. Une cote intermédiaire de 6, la même que pour les roches du Membre de l'Étang-du-Nord, a été sélectionnée.

Aucune mesure de propriété hydraulique n'est disponible pour les dunes de sable, composées de sable fin uniforme. La modélisation numérique a permis d'obtenir une valeur calibrée de conductivité hydraulique d'environ  $1 \times 10^{-4}$  m/s, soit la valeur la plus élevée pour le territoire d'étude. La cote type de 8, pour le sable et gravier, a été attribuée.

**Tableau A.59 : Cotes retenues par unité géologique constituant les milieux aquifères**

Unité géologique	Lithologie	Nombre de mesures de conductivité hydraulique	Valeur moyenne (m/s)	Valeur considérée (m/s)	Cote type	Cote retenue
Dunes de sable	Sable fin uniforme	0	nd	$1,03 \times 10^{-4}$	8	8
Dépôts chenalisés	Sable fin hétérogène	4	$1,48 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^{-5}$	8	6
Étang-des-Caps	Grès éoliens	152	$5,95 \times 10^{-5}$	$5,95 \times 10^{-5}$	6	7
Étang-du-Nord	Grès, siltstones et mudstones	33	$1,97 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-5}$	6	6
Dykes et stocks de gabbro	Dykes et stocks de gabbro	0	nd	$4,73 \times 10^{-6}$	8	5
Cap-au-Diable	Roches volcaniques	66	$4,73 \times 10^{-6}$	$4,73 \times 10^{-6}$	8	5
Havre-aux-Maisons	Brèches, terrigènes, calcaires, évaporites	2	$1,88 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-6}$	6	5

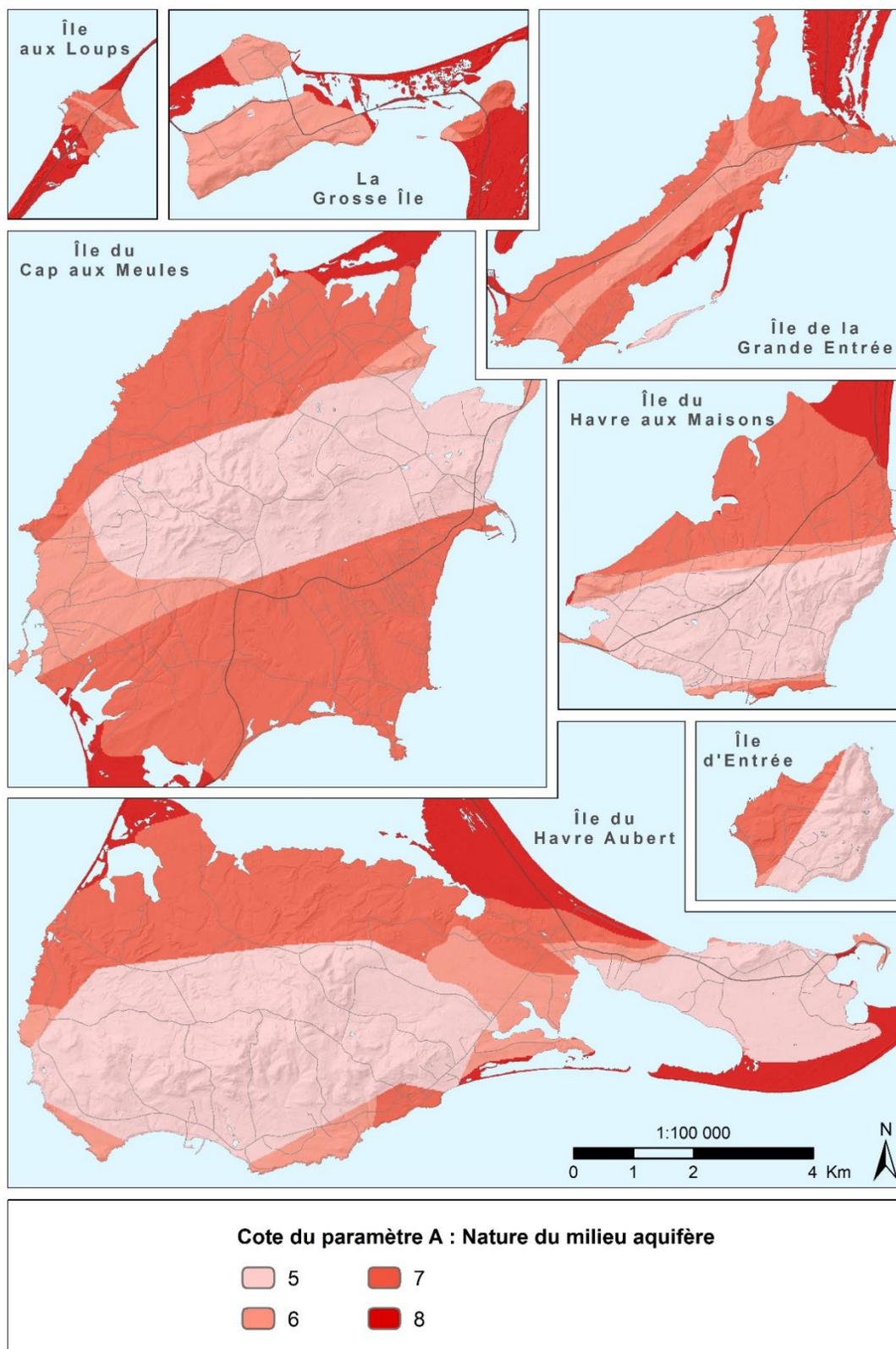


Figure A.108 : Cotes du paramètre A : Nature du milieu aquifère de la méthode DRASTIC

**S : *Type de sol***

La texture du sol, présentée sur la Carte 10 : Pédologie, en annexe électronique (Section 2.3.6), a permis de sélectionner les cotes du paramètre S : Type de sol. Plus un sol est perméable, plus la capacité d'infiltration d'un contaminant mobilisé par l'eau est grande.

Les sols sableux, à la cote de 9, s'observent sur les plateaux de grès et les dunes de sable (Figure A.109). Les sols loameux, à la cote de 5, et les sols argileux, à la cote de 1, se retrouvent surtout sur les buttes centrales. Les sols organiques, à la cote de 2, constitués de terre noire, sont localisés aux droits des milieux humides près du rivage.

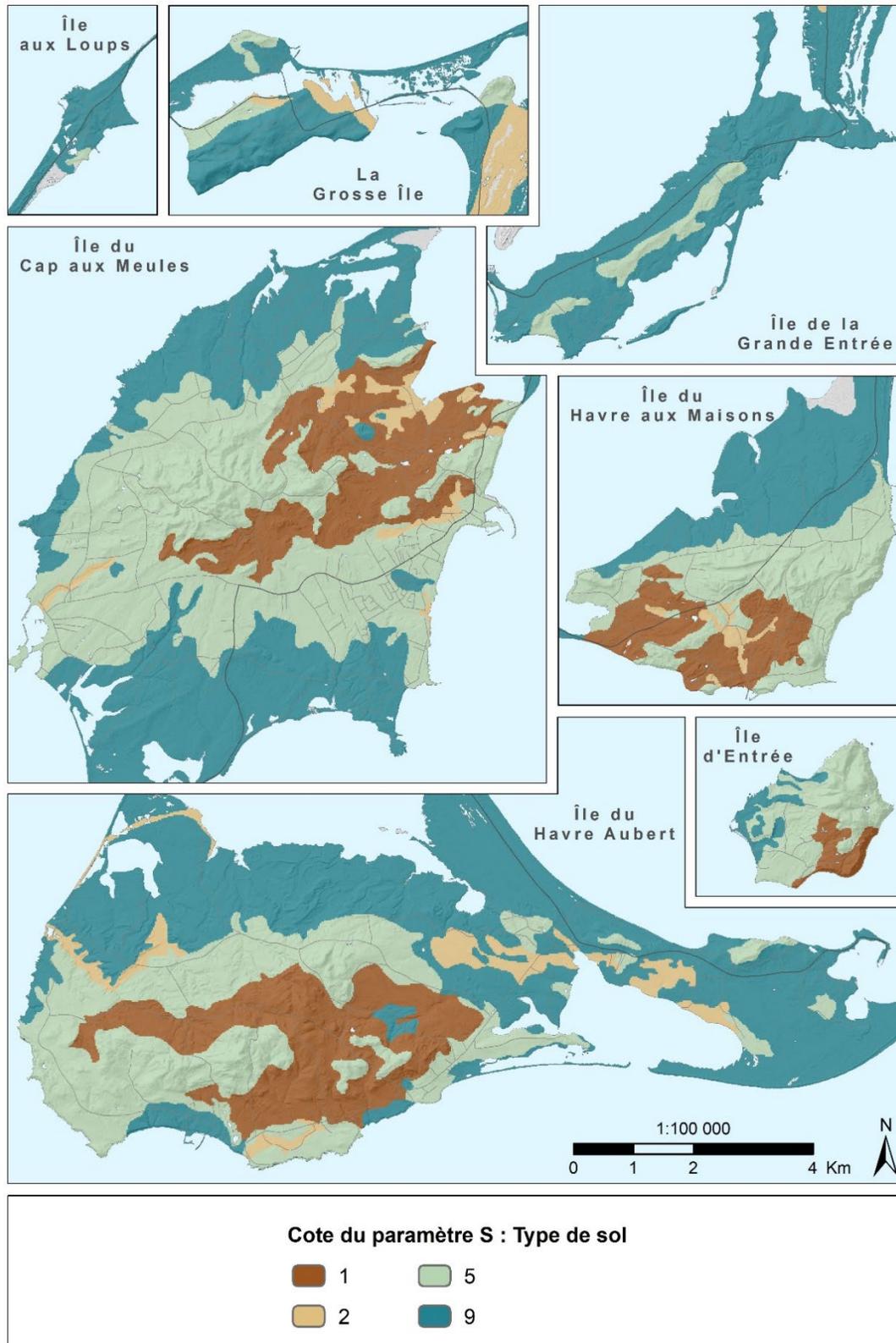


Figure A.109 : Cotes du paramètre S : Type de sol de la méthode DRASTIC

***T : Pente du sol***

Les valeurs de la Carte 6 : Pente du sol, en annexe électronique, (Section 2.3.2), ont été utilisées directement pour attribuer les cotes du paramètre T : Pente du sol. Plus la surface du sol est pentue, plus un contaminant peut être mobilisé par l'eau de ruissellement, et moins il a de chance de s'infiltrer dans le sol.

On retrouve la gamme complète des cotes possibles aux îles de la Madeleine, de 1 à 10. Les pentes les plus abruptes s'observent sur les flancs des buttes centrales des îles, tandis que les plus faibles se retrouvent sur les plateaux de grès (Figure A.110).

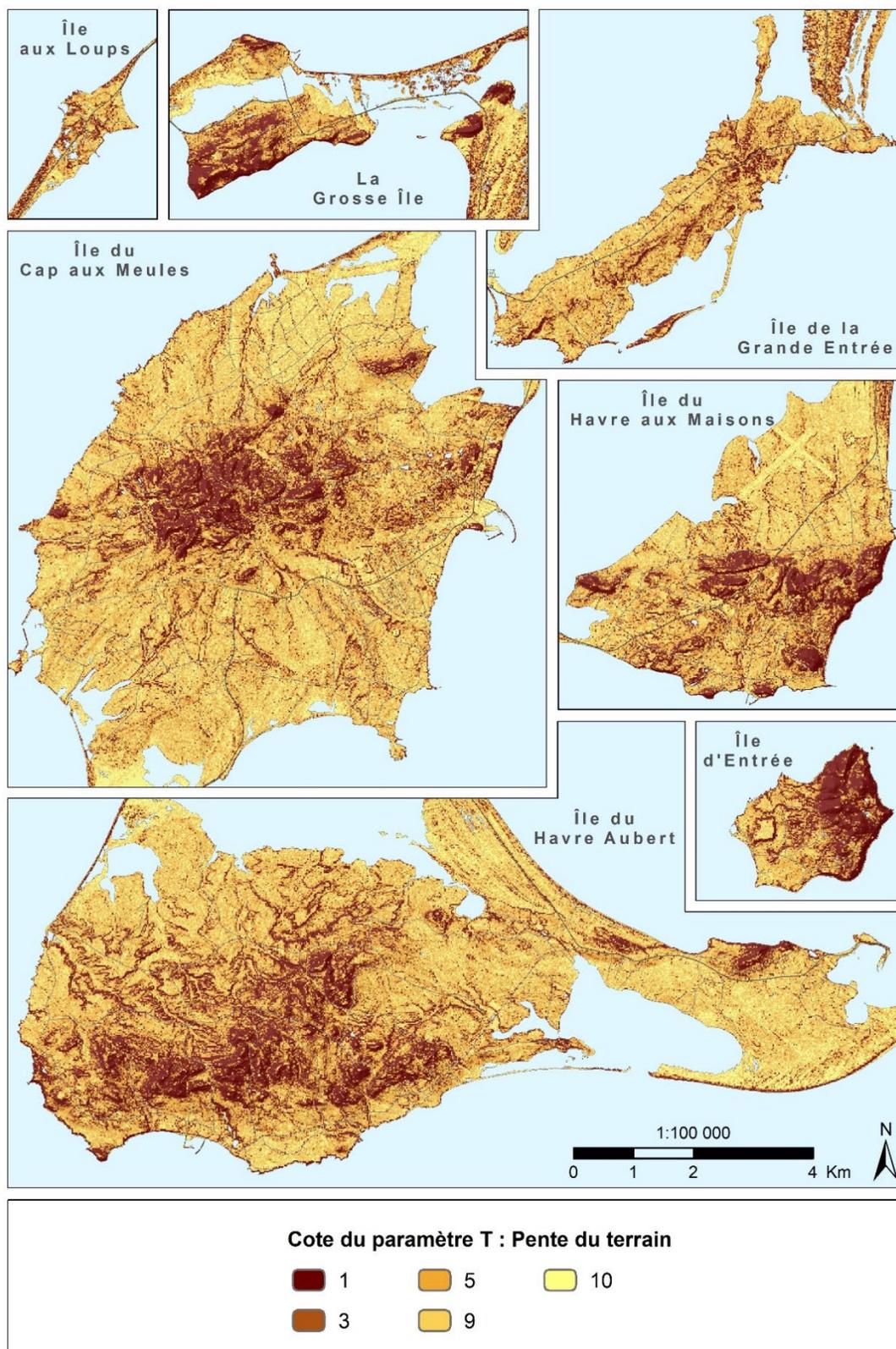


Figure A.110 : Cotes du paramètre T : Pente du terrain de la méthode DRASTIC

### ***I : Nature de la zone vadose***

Plus les matériaux de la zone vadose (ou non saturée) sont perméables, plus la capacité de percolation d'un contaminant mobilisé par l'eau est élevée, et plus son potentiel d'atténuation dans la zone vadose est faible. Pour connaître les matériaux constituant la zone vadose, la position de la surface libre de la nappe doit normalement être comparée à la stratigraphie, incluant les sédiments et le roc, et l'épaisseur des dépôts meubles. Une méthode simplifiée a pu toutefois être employée pour les îles de la Madeleine pour les raisons suivantes :

- Aucun empilement significatif de couches de sédiments n'est observé. Ainsi, la zone vadose n'est partout constituée que d'un seul type de dépôts meubles (Section 5.1.2.1).
- À l'exception de l'île de la Grande Entrée, on retrouve globalement une fine couverture de dépôts meubles, en moyenne de 1,8 m (médiane de 0,7 m des mailles de 20 m par 20 m de la Carte 19 : Épaisseur des dépôts meubles, en annexe électronique – Section 5.1.2.2). La zone vadose est quant à elle généralement plus épaisse, en moyenne de 9 m selon la profondeur à la nappe (médiane de 5 m des mailles de 20 m par 20 m de la Carte 23 : Profondeur à la nappe, en annexe électronique – Section 8.3.1.3). Ainsi, le roc fait le plus souvent partie de la zone vadose.

Ainsi, deux types de matériau, soit la couche unique de dépôt meuble et le roc sous-jacent ont été considérés en tout point sur le territoire. Une cote a été attribuée pour chacun et la cote la plus faible, correspondant au matériau limitant le plus la percolation de l'eau, a été retenue pour la cote finale du paramètre I : Nature de la zone vadose. La Figure A.111 montre le résultat final de ces cotes sur les îles principales.

Pour les dépôts meubles, une correspondance avec les matériaux proposés par la méthode DRASTIC a été réalisée. Le Tableau A.60 décrit les matériaux qui forment les différents types de dépôt meuble que l'on observe sur la Carte 18 : Géologie des formations superficielles, en annexe électronique (Section 5.1.2.1). Comme des intervalles de cote sont proposés par la méthode DRASTIC, les cotes retenues pour les dépôts meubles sont aussi indiquées au Tableau A.60. À part les sédiments organiques, les dépôts meubles de surface sont tous relativement perméables. Les sédiments éoliens, de versant, alluviaux, et littoraux et pré-littoraux, sont tous formés de sable bien trié, avec parfois la présence de particules plus grossières. La cote type de 8 leur a été attribuée. La cote de 7 a été choisie pour les sédiments lacustres et glaciomarins non différenciés. Ils sont considérés moins perméables que les dépôts meubles précédents, car bien que constitués des mêmes matériaux, ces derniers sont moins uniformes. Une cote encore plus faible de 6 a été choisie pour les tills, en couverture mince ou non, à cause de la présence de silt dans la matrice sableuse. Enfin, la cote type de 3 pour le silt ou l'argile a été sélectionnée pour la matière organique.

Pour le roc, les mêmes cotes que celles retenues pour le paramètre A : Nature du milieu aquifère ont été utilisées (Tableau A.59). Le plus souvent, le roc est considéré comme moins perméable que les dépôts meubles. Dans ces cas, c'est la cote du roc qui est sélectionnée pour la zone vadose. Lorsque des sédiments organiques sont présents, c'est la cote des dépôts meubles qui est retenue. Sur les secteurs où l'on retrouve une couverture de till, la cote des dépôts meubles est utilisée, à moins que le roc sous-jacent soit constitué des formations géologiques moins perméables du Havre aux Maisons et du Cap au Diable, ou des dykes et stocks de gabbro.

**Tableau A.60 : Cotes retenues par type de dépôt meuble constituant les zones vadoses**

Type de dépôt meuble	Matériau	Type de matériau correspondant	Cote type	Cote retenue
Sédiment organique non différencié	Matière organique	Silt ou argile	3	3
Sédiment éolien	Sable fin uniforme	Sable et gravier	8	8
Dépôt de versant non différencié	Sable, gravier, caillou et bloc	Sable et gravier	8	8
Cône alluvial	Sable, gravier et galet stratifiés	Sable et gravier	8	8
Alluvion non différenciée	Sable	Sable et gravier	8	8
Sédiment lacustre non différencié	Sable fin avec des cailloux et un peu de gravier	Sable et gravier	8	7
Sédiment marin littoral et pré-littoral	Sable et gravier bien triés	Sable et gravier	8	8
Sédiment glaciomarin littoral et pré-littoral	Sable et gravier bien triés	Sable et gravier	8	8
Sédiment glaciomarin non différencié	Sable fin avec des cailloux et un peu de gravier	Sable et gravier	8	7
Till en couverture généralement continue	Sable fin avec un peu de silt et présence de cailloux	Sable et gravier avec silt et argile	6	6
Till en couverture mince et discontinue	Sable fin avec un peu de silt et présence de cailloux	Sable et gravier avec silt et argile	6	6

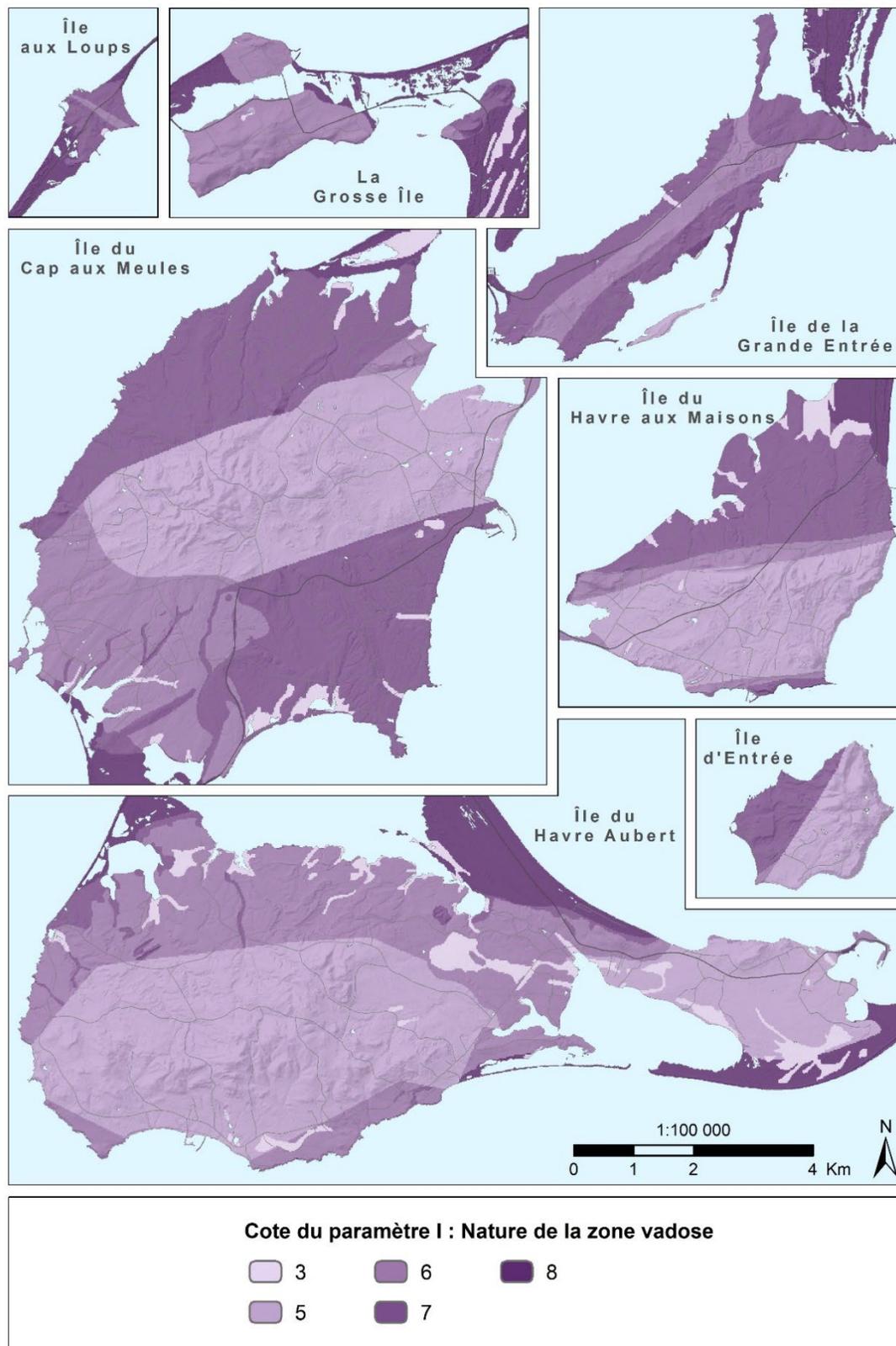


Figure A.111 : Cotes du paramètre I : Nature de la zone vadose de la méthode DRASTIC

### **C : Conductivité hydraulique de l'aquifère**

Pour déterminer les cotes du paramètre C : Conductivité hydraulique de l'aquifère, les mêmes conductivités hydrauliques moyennes utilisées pour évaluer les cotes du paramètre A : Nature du milieu aquifère ont été employées (Tableau A.59). Plus la conductivité hydraulique est élevée, plus un contaminant mobilisé par l'eau peut circuler dans l'aquifère.

Pour une cote plus élevée que 1, la conductivité hydraulique doit être supérieure à 4 m/j, ce qui correspond à  $4,62 \times 10^{-5}$  m/s. Seules les conductivités moyennes des grès du Membre de l'Étang-des-Caps et des dunes de sable sont plus élevées. Par contre, elles sont plus faibles que 12 m/jour, équivalent à  $1,39 \times 10^{-4}$  m/s, leur conférant une cote de 2. Une cote de 1 a été retenue pour toutes les autres unités géologiques. À noter que le nombre de mesures de conductivité hydraulique disponibles pour la Formation du Havre aux Maisons étant insuffisant, la même valeur moyenne que pour la Formation du Cap au Diable a été utilisée. La Figure A.112 montre les cotes retenues sur les îles principales.

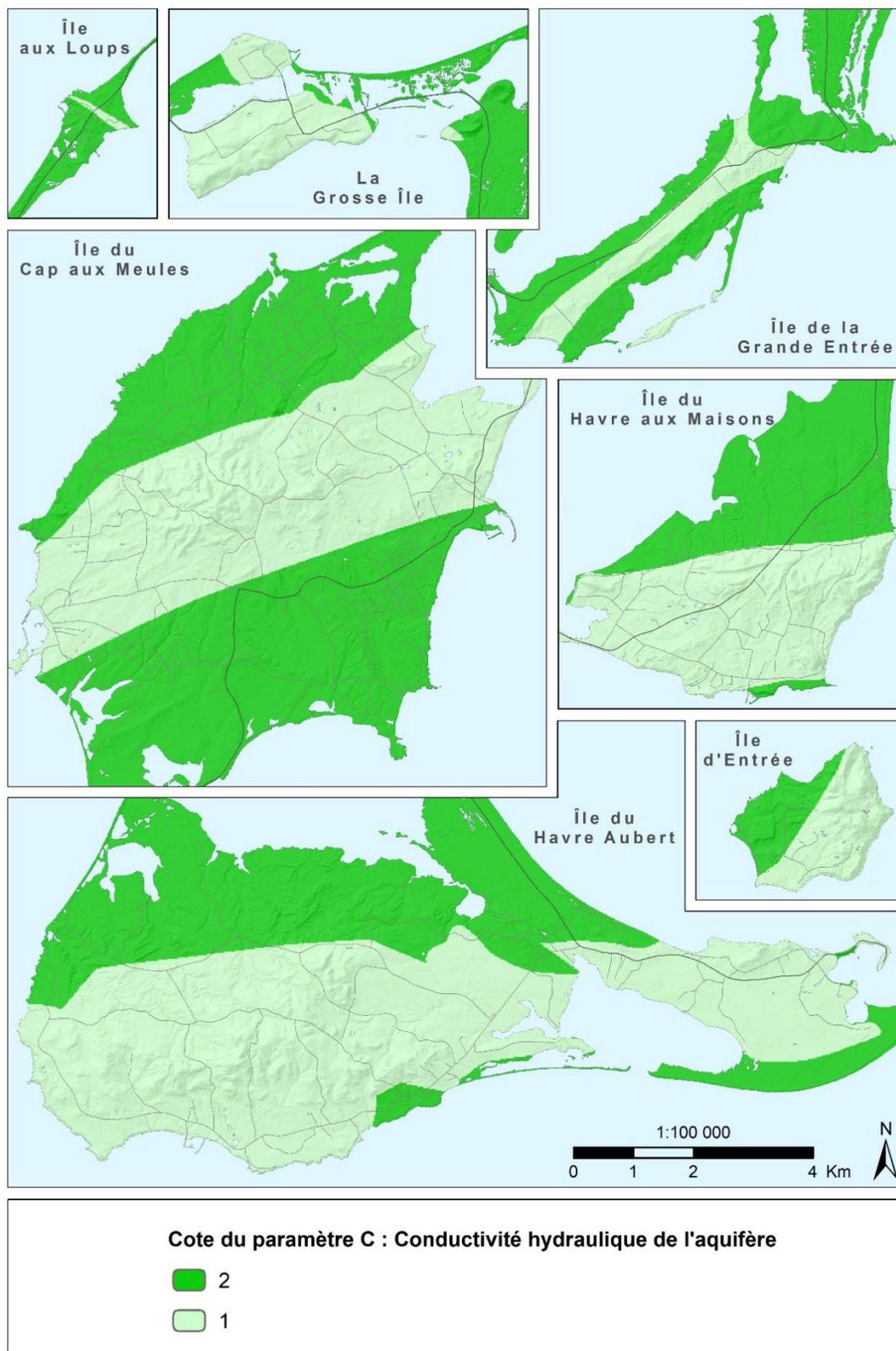


Figure A.112 : Cotes du paramètre C : Conductivité hydraulique de l'aquifère de la méthode DRASTIC