

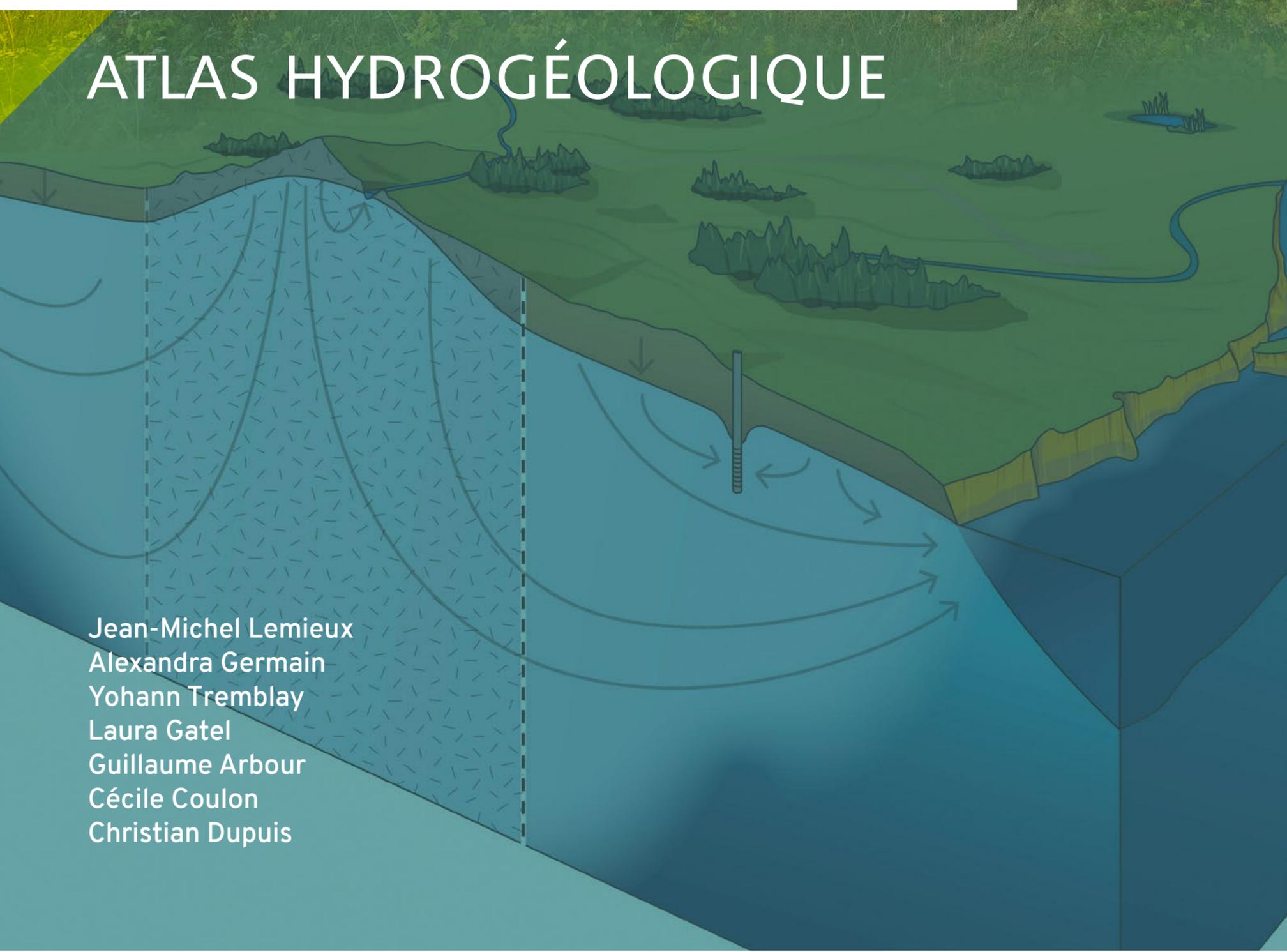


PORTRAIT DES RESSOURCES

EN EAU SOUTERRAINE DES

ÎLES DE LA MADELEINE

ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE



Jean-Michel Lemieux
Alexandra Germain
Yohann Tremblay
Laura Gatel
Guillaume Arbour
Cécile Coulon
Christian Dupuis



UNIVERSITÉ
LAVAL

PORTRAIT DES RESSOURCES

EN EAU SOUTERRAINE DES

ÎLES DE LA MADELEINE

ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval:

- Jean-Michel Lemieux, professeur
- J. Christian Dupuis, professeur
- John Molson, professeur
- Alexandra Germain, professionnelle de recherche
- Yohann Tremblay, professionnel de recherche
- Guillaume Arbour, professionnel de recherche
- Laura Gatel, professionnelle de recherche
- Cécile Coulon, étudiante au doctorat
- Frédéric Croteau, étudiant à la maîtrise
- Marjorie Parenteau-Thibault, étudiante à la maîtrise
- Léo Adam-Sawyer, étudiant à la maîtrise
- Cédric Dubuc, auxiliaire de recherche

PARTENAIRES

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

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement:

- Erwan Gloaguen, professeur
- Ble Jean Fidele Yrro, professionnel de recherche
- Abderrezak Bouchedda, professionnel de recherche
- Maxime Clapood, professionnel de recherche

Commission géologique du Canada:

- Michel Parent, chercheur

Université de Sherbrooke:

- Jean-Marie M. Dubois

COMITÉ DE SUIVI

Membres du comité de suivi restreint:

- Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine
- Table de concertation régionale 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

Membres 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
- Direction régionale Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
- Centre de services des Îles-de-la-Madeleine du ministère des Transports du Québec
- Direction régionale Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
- 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 des Îles
- Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes
- Conseil régional de l'Environnement Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine

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 pour la réalisation de travaux de géophysique, ainsi que celui de Michel Parent, de la Commission géologique du Canada, pour le partage de ses connaissances sur les formations géologiques superficielles des îles de la Madeleine.

Nous saluons la participation de tous les partenaires des comités de suivi du projet, restreint et élargi, 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 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 de transfert et 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-SW2 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 finalement 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.

ACCESSIBILITÉ DES DOCUMENTS

Le rapport scientifique du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* et ses annexes cartographiques électroniques sont libres d'accès et pourront être consultés sur la page *Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques à l'adresse suivante: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>

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.

Pour le lecteur intéressé par les détails techniques de la préparation, du développement et de l'utilisation des modèles numériques développés dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, 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 publiées sur Dataverse: <https://doi.org/10.5683/SP3/RGOLLE>.

FINANCEMENT

Ce projet est entièrement financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Il n'aurait pas été possible sans la mise sur pied des Projets d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines par le ministère. Nous saluons la volonté du ministère d'acquiescer 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.

CONCEPTION GRAPHIQUE ET ILLUSTRATIONS

La conception graphique et la plupart des illustrations ont été réalisées par Julie Ferland de la Faculté de Foresterie, géographie et géomatique, Université Laval

RÉFÉRENCE À CITER

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 – Atlas hydrogéologique*, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, juin 2022, 76 p.

Table des matières

Introduction	5	Modèles hydrogéologiques numériques	38
Présentation du territoire	6	Conditions hydrogéologiques	40
Localisation	6	Formations aquifères.....	40
Démographie	6	Potential d'exploitation des formations aquifères	40
Élévation du sol.....	8	Piézométrie.....	42
Bathymétrie.....	8	Position de l'interface eau douce – eau salée.....	48
Pente du sol.....	8	Épaisseur de la lentille d'eau douce	48
Hydrographie	10	Volume d'eau disponible.....	48
Milieus humides	10	Bilan hydrologique.....	52
Pédologie.....	12	Qualité de l'eau souterraine.....	60
Climat	14	Vulnérabilité de l'eau souterraine	66
Niveau de la mer et marée.....	15	Coupes hydrogéologiques.....	68
Couverture végétale	16	Gestion durable des ressources en eau souterraine	70
Occupation du sol.....	16	Évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux.....	70
Affectation du territoire.....	18	Quantification des ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place	71
Aires protégées.....	18	Délimitation des aires d'alimentation des aquifères exploitables.....	72
Exploitation des eaux souterraines	20	Conclusion	74
Systèmes de distribution en eau potable	20	Liste de références	76
Usage de la ressource.....	22		
Contexte géologique	24		
Géologie du socle rocheux.....	24		
Géologie des îles de la Madeleine	25		
Topographie du roc.....	28		
Géologie des formations superficielles	30		
Épaisseur des dépôts meubles	30		
Description des dépôts meubles.....	32		
Contexte hydrogéologique	34		
Contexte hydrogéologique régional.....	34		
Interface eau douce – eau salée.....	34		
Pressions sur l'eau souterraine	36		
Intrusion d'eau salée dans des puits de captage.....	36		
Changements climatiques	36		
Activités humaines menaçantes	36		

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 phréatique ou la perte de la disponibilité de cette ressource s'avérerait catastrophique, tant au niveau social, qu'économique et environnemental. De par son caractère insulaire, l'archipel est vulnérable à l'intrusion d'eau salée dans le réservoir d'eau souterraine exploitable. Les changements climatiques pourraient accroître 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 à être affectée par un contaminant qui proviendrait de la surface. Or, le territoire est largement développé, avec une multitude d'activités humaines qui y sont pratiquées. Ces dernières peuvent parfois être incompatibles avec la protection de la ressource et constituer des menaces pour l'eau souterraine qui est généralement de grande 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, depuis la surface, et d'en dessous, depuis l'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, avant tout basées sur la connaissance accrue sur les eaux souterraines et les aquifères qui les contiennent.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

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 ?

THÉMATIQUES COUVERTES

Le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* 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 exploitable, le bilan hydrologique incluant l'estimation de la recharge, la qualité de l'eau et la vulnérabilité des aquifères. Ces analyses reposent sur les nombreuses études antérieures décrivant le contexte géologique et hydrogéologique du

territoire, les campagnes de terrain réalisées dans le cadre de ce portrait, et les travaux d'interprétation et de modélisation des écoulements de l'eau souterraine. La modélisation numérique a permis d'évaluer les remontées de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux, de simuler l'impact des pompages du réseau de distribution actuel et de déterminer les risques futurs de salinisation des puits d'alimentation tout en tenant compte des changements climatiques, et de proposer des zones à protéger pour préserver la qualité des eaux exploitables.

DÉMARCHE DE RÉALISATION

Le projet, d'une durée de quatre ans (avril 2018 à mars 2022), a été réalisé en trois phases principales, soit :

- **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.

L'ATLAS HYDROGÉOLOGIQUE

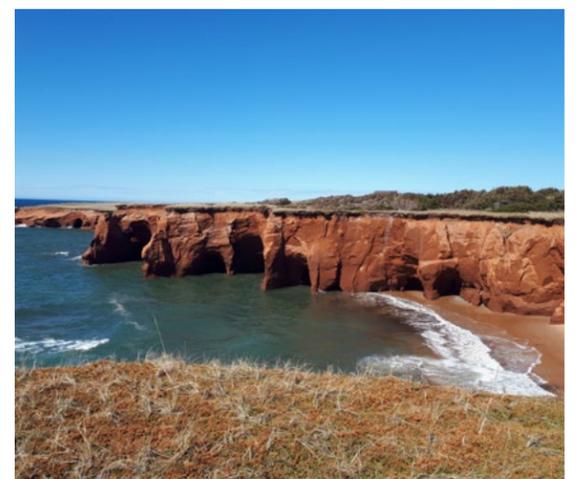
Le présent atlas hydrogéologique est une synthèse du rapport scientifique du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* (Lemieux et coll., 2022). Il vise à rendre plus accessibles les connaissances acquises sur les eaux souterraines du territoire étudié. Ainsi, les concepts présentés dans cet atlas sont simplifiés. Pour de plus amples informations sur une ou des thématiques présentées dans cet atlas, le lecteur est invité à consulter le rapport scientifique et les cartes associés.

Outre l'introduction, l'atlas hydrogéologique comprend neuf sections supplémentaires. La première section présente le territoire d'étude, incluant les milieux naturels et humains. La deuxième section porte sur l'exploitation des eaux souterraines et décrit les systèmes de distribution municipaux en eau potable et les différents usages qui sont faits de la ressource. Le contexte géologique spécifique aux îles de la Madeleine est présenté à la troisième section,

comprenant la géologie du socle rocheux et la géologie des formations superficielles. La quatrième section détaille le contexte hydrogéologique et informe sur la présence de l'interface eau douce – eau salée. Les pressions exercées sur la ressource, notamment le risque d'intrusion d'eau salée, les changements climatiques et les activités humaines menaçantes, sont discutées à la cinquième section. La sixième section 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 septième section, qui décrit les conditions hydrogéologiques du territoire, par exemple la piézométrie, le bilan hydrologique, la qualité de l'eau souterraine et la vulnérabilité des aquifères. La modélisation numérique a aussi permis de produire, à la huitième section, des outils quantitatifs utiles pour la gestion durable de la ressource. La neuvième et dernière section discute des constats principaux à retenir de cette étude et soumet des recommandations.

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 pour l'ensemble 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.



Belle-Anse, île du Cap aux Meules.



Paysage du nord de l'île du Havre aux Maisons.

Présentation du territoire

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. Sept des îles rocheuses principales sont 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, non habitée et à une vingtaine de kilomètres au nord de la Grosse Île, constitue la huitième île rocheuse.

Le cadre du territoire d'étude du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine* se limite aux sept îles rocheuses principales et habitées. 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.

SUPERFICIE

La superficie terrestre totale de l'archipel des îles de la Madeleine, calculée à partir des données cartographiques de la Base de données topographiques du Québec, s'élève à 190,5 km². Celles des îles principales habitées varient de 0,8 km² pour l'île aux Loups, à 46,1 km² pour l'île du Cap aux Meules, pour un total de

122,9 km², mais ne forment que 65 % du territoire terrestre de l'archipel. 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 km². La somme des autres îlots rocheux représente 2 % du territoire.

INFRASTRUCTURES

La densité des habitations est faible aux îles de la Madeleine, mais celles-ci 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, L'Étang-du-Nord, 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. 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 quotidiennes sont assurées depuis notamment les villes de Montréal, Québec, Gaspé et Bonaventure. L'aéroport se situe sur l'île du Havre aux Maisons.

En 2020, la population de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine était estimée à **12 774 résidents** permanents.

LIMITES ADMINISTRATIVES

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, 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. Ces municipalités 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.

Démographie

En 2020, la population de la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine était estimée à 12 774 résidents permanents (ISQ, 2021). En considérant la superficie totale de l'archipel de 190,5 km², la densité de la population serait de 67,1 habitants par km². 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 %.

Le nombre d'habitants par île a été estimé en utilisant l'inventaire des installations septiques autonomes de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine ainsi que le nombre de résidents moyen par ménage privé (Statistique Canada, 2017).

Les projections de la population sur l'horizon 2020-2041 montrent une augmentation de la population de 2,0 % pour la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine, comparativement à une hausse de 10,6 % pour l'ensemble du Québec (ISQ, 2021).

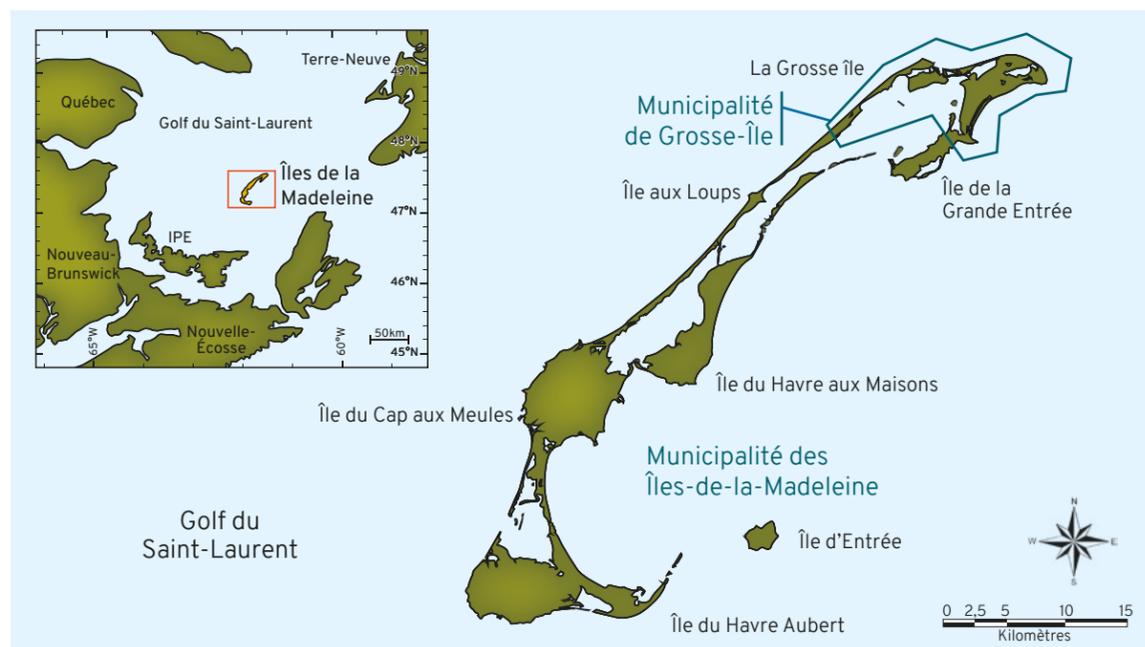
Démographie de la Communauté maritime Les Îles de la Madeleine en 2020

Île / Municipalité	Population
Île d'Entrée	60 ¹
Havre Aubert	2 413 ¹
Cap aux Meules	7 137 ¹
Havre aux Maisons	1 934 ¹
Île aux Loups	176 ¹
Grande Entrée	574 ¹
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	12 301 ²
Municipalité de Grosse-Île	473 ²
Communauté maritime Les Îles de la Madeleine	12 774 ²

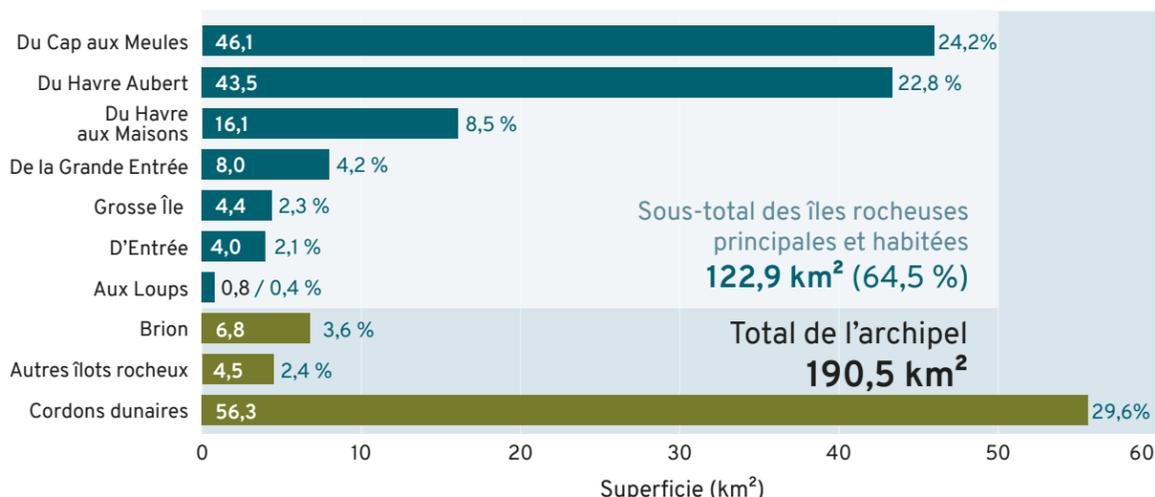
¹: Valeurs estimées par l'Université Laval
²: Valeurs provenant de l'Institut de la statistique du Québec

TOURISME

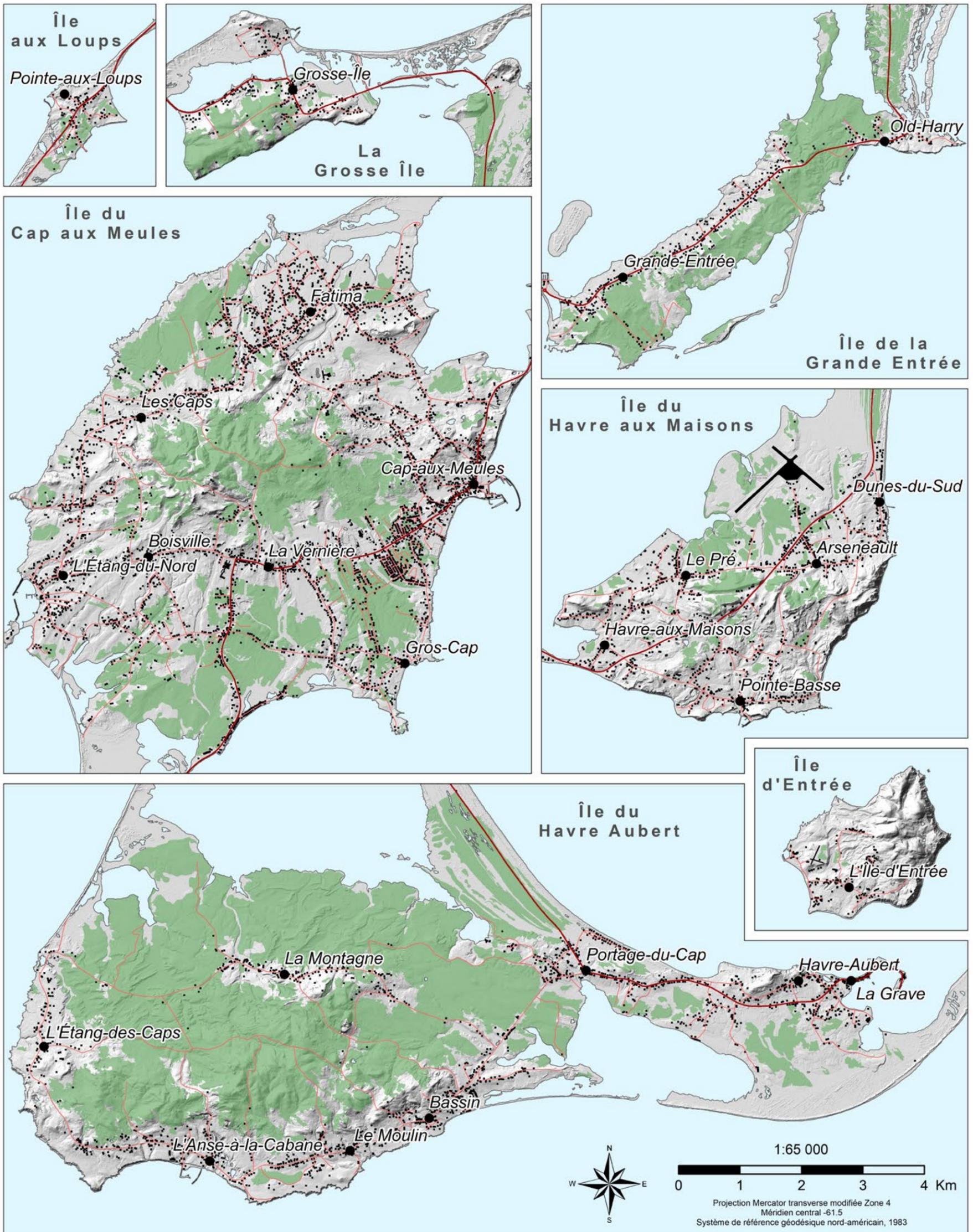
Le tourisme est un secteur d'activité économique prépondérant aux îles de la Madeleine. En 2018, Tourisme Îles de la Madeleine estime un total de 77 700 visiteurs, dont la majorité (60 000 visiteurs, 77 %) durant la saison estivale de juin à septembre. Dans ce dénombrement, aucune distinction n'est faite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



Localisation du territoire d'étude et limites administratives.



Proportion de la superficie des îles par rapport à l'ensemble de l'archipel.



LES SEPT ÎLES ROCHEUSES PRINCIPALES ET HABITÉES

Bâtiment et équipement

● Lieu habité

Route nationale

Route locale

Plan d'eau

Milieu boisée

Sources

- Lieux habités et toponymes : Base de données géographiques et administratives, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2017)
- Bâtiments, équipements et végétation : Base de données topographiques du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Élévation du sol

L'élévation du sol influence les directions d'écoulement des eaux souterraines et les zones de réalimentation (recharge) des aquifères. L'écoulement souterrain régional se fait généralement des hauts topographiques, qui sont souvent des zones de recharge des aquifères, vers les bas topographiques.

Les données d'élévation du sol sont issues d'un modèle altimétrique numérique, à une résolution spatiale de 1 m, dérivé du relevé LiDAR de 2018 du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

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 constituées de roches volcaniques plus résistantes à l'érosion que les terrains environnants composés de roches sédimentaires, majoritairement des grès. 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. Autrement, plus de 75 % du territoire de l'archipel se situe à moins de 25 m d'altitude.

Élévation maximale pour chaque île de l'archipel

Île	Élévation maximale (m)
D'Entrée	169
Cap aux Meules	156
Havre Aubert	141
Havre aux Maisons	106
Grosse Île	86
Grande Entrée	48
Aux Loups	22

Bathymétrie

La bathymétrie est une mesure des profondeurs marines qui permet de déterminer la topographie des fonds marins.

La bathymétrie provient d'un modèle numérique, à une résolution spatiale de 20 m, dérivé des données bathymétriques de Pêches et Océans Canada.

L'élévation du fond marin diminue lentement autour des îles. La profondeur de la mer est généralement 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.

Pente du sol

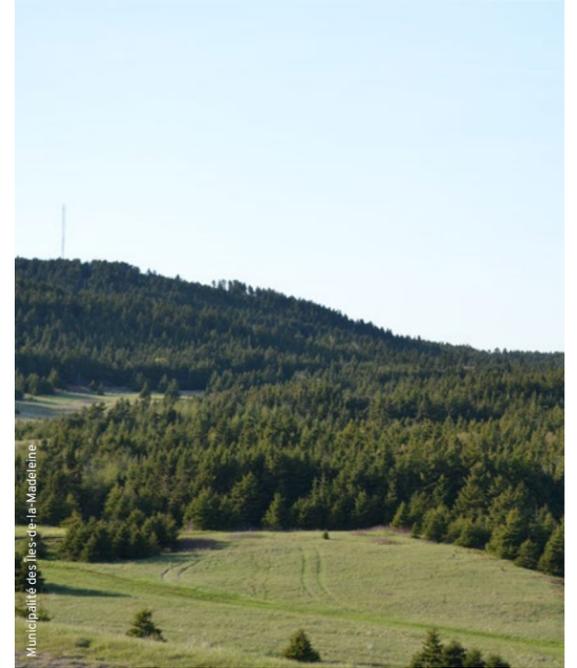
La pente du sol influence le ruissellement des précipitations ainsi que le drainage des sols et la recharge des aquifères. En effet, plus la pente est forte, plus il y aura de ruissellement à la surface du sol et moins il y aura d'infiltration d'eau dans le sol pour réalimenter les aquifères.

La pente du sol est dérivée, à une résolution spatiale de 1 m, du relevé LiDAR de 2018 du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

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**

Sur l'archipel, la pente varie entre 0 % (pente nulle) et 40 % (pente excessive). Sur le centre des îles, les buttes présentent un relief accidenté, avec 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.



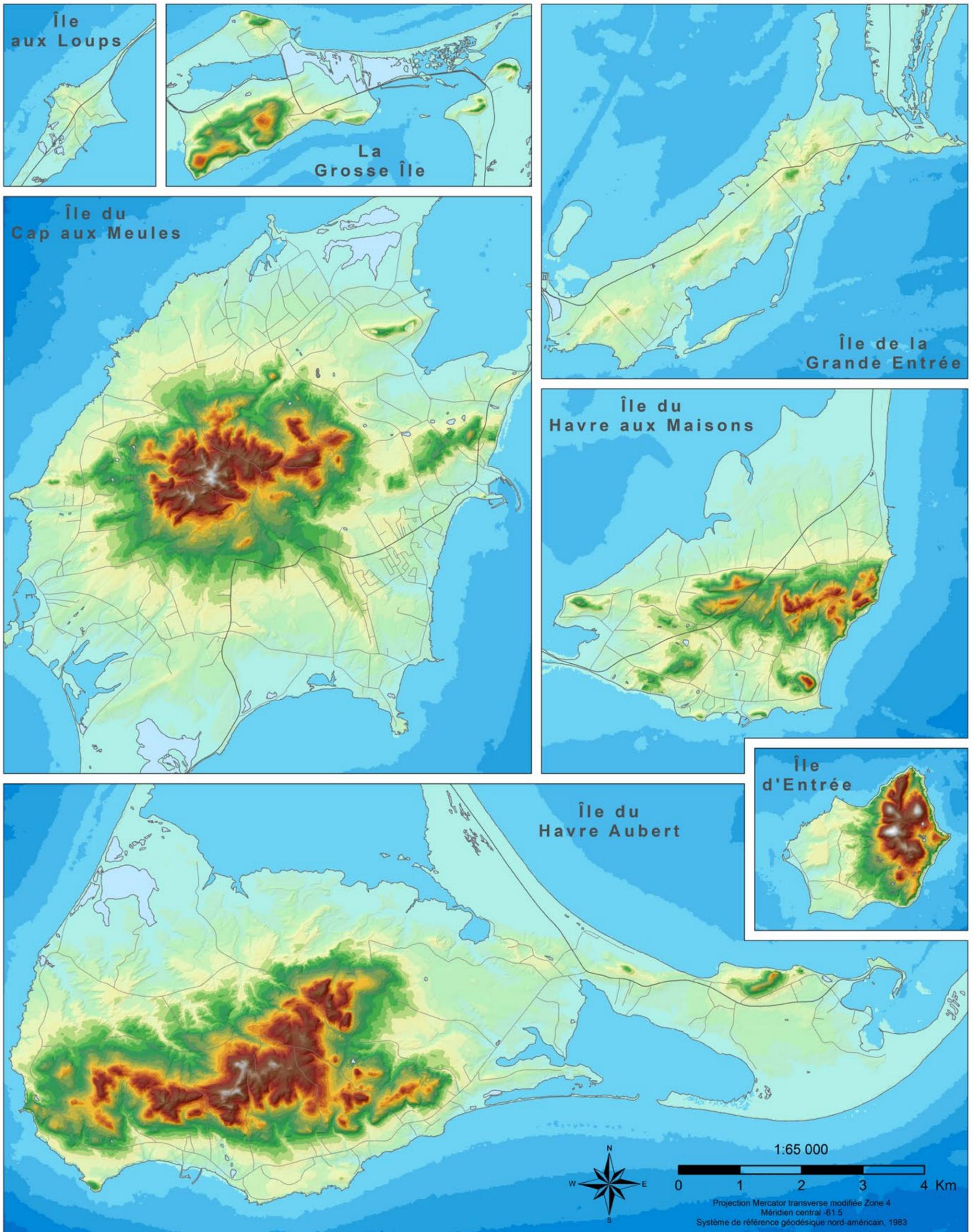
Butte du vent, culminant à 156 m d'altitude, île du Cap aux Meules.



Butte des Demoiselles, culminant à 82 m d'altitude, île du Havre Aubert.



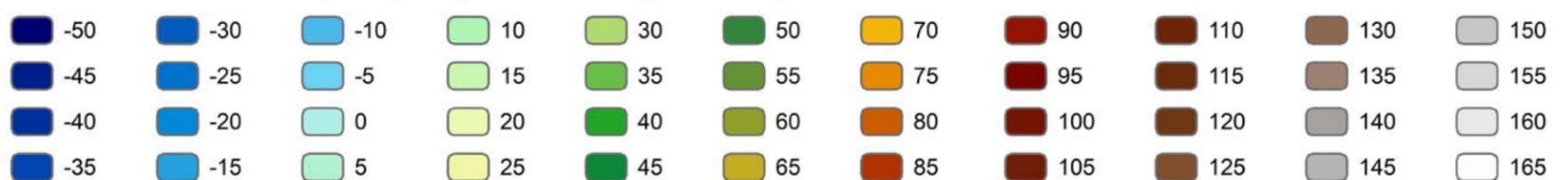
Big Hill, culminant à 169 m d'altitude, île d'Entrée.



MODÈLE ALTIMÉTRIQUE NUMÉRIQUE ET BATHYMÉTRIE

Route nationale
 Route locale
 Lac ou étang

Élévation du sol ou fond marin (mètre par rapport au niveau moyen des mers)



Sources

- Modèle altimétrique numérique et relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Bathymétrie : Pêches et Océans Canada (2019)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Hydrographie

Les cours d'eau et les plans d'eau correspondent à des zones d'échange entre les eaux de surface et souterraines. Au Québec, ces endroits sont habituellement réalimentés par les eaux souterraines, ce qui assure un débit de base qui permet à certains cours d'eau d'être permanent, même lors de la saison hivernale.

Les données cartographiques utilisées pour la carte d'hydrographie proviennent de la Géobase du réseau hydrographique du Québec. Il s'agit d'un référentiel commun de l'hydrographie pour l'ensemble du territoire québécois.

COURS D'EAU

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 au total 301 km de long.

PLANS D'EAU

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 du 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, 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 ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Dimension des types de milieux aquatiques

(excluant les milieux directement ouverts sur la mer)

Type de milieu	Longueur ou superficie totale
Cours d'eau permanents	60 km
Cours d'eau intermittents	301 km
Plans d'eau (lac ou étang)	676 ha

Milieux humides

Les milieux humides sont des secteurs inondés ou saturés d'eau depuis assez longtemps pour entraîner un changement de la composition du sol ou de la végétation. Ces milieux peuvent être un lieu d'échange entre l'eau de surface et l'eau souterraine, correspondant généralement à des résurgences d'eau souterraine.

Les données cartographiques proviennent prioritairement du Comité ZIP des Îles, ayant effectué quatre phases de caractérisation des milieux humides en terres privées entre 2005 et 2020. Pour les milieux humides en terres publiques, les données issues de l'Inventaire écoforestier du Québec méridional, du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, ont été utilisées. Enfin, les milieux humides potentiels du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, ayant une couverture spatiale plus vaste que les données précédentes, ont été ajoutés.

Les milieux humides couvrent une superficie de 4 528 ha (45,3 km²), ce qui représente environ le quart du territoire d'étude. Les tourbières sont le type 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. 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

Le réseau hydrographique est relativement peu développé aux îles de la Madeleine.

Les milieux humides couvrent une superficie de 4 528 ha (45,3 km²), ce qui représente environ le **quart du territoire d'étude**.

Superficie par type de milieux humides

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

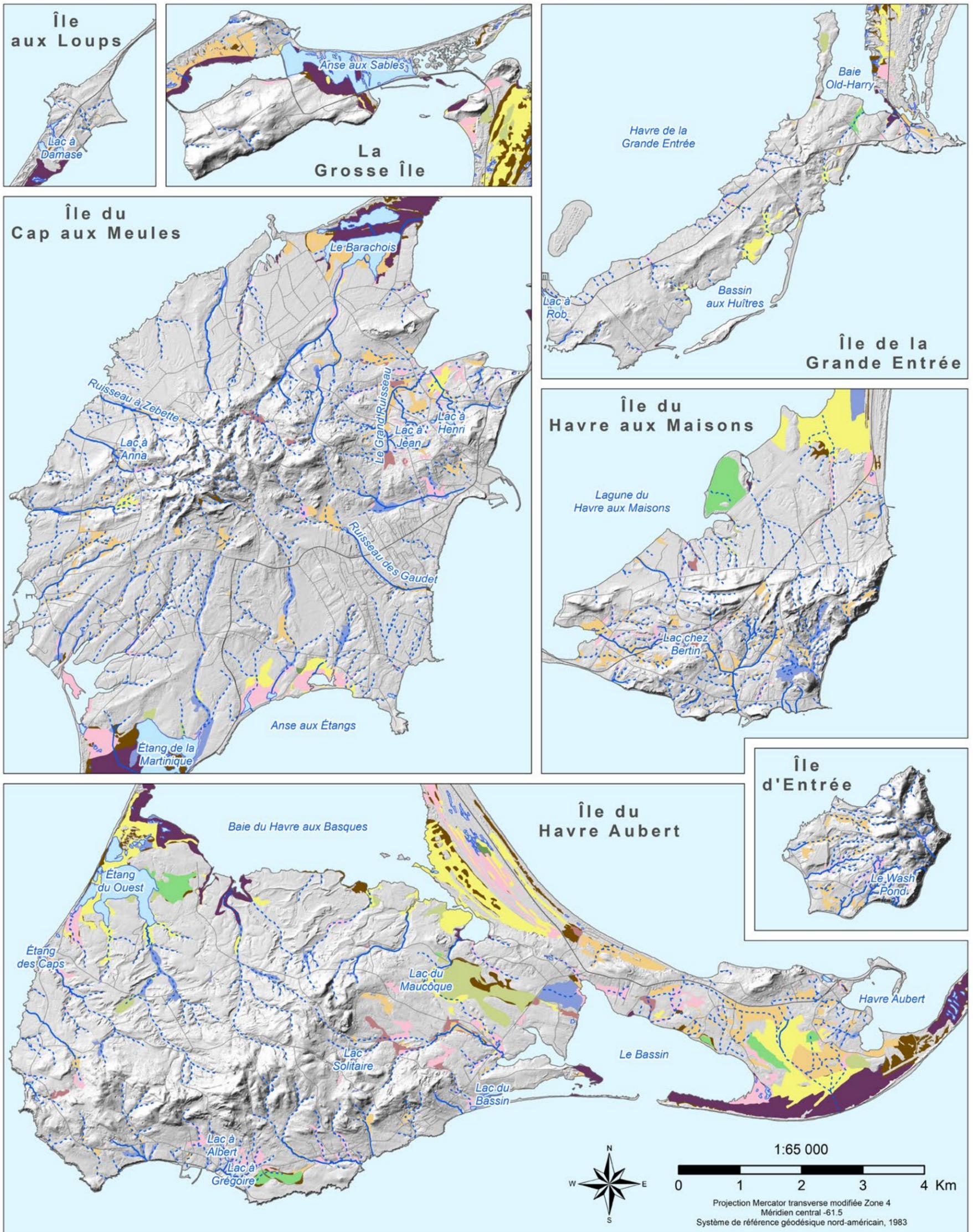
non négligeables (représentant respectivement 12 %, 9 % et 9 % des milieux humides), sont généralement plus petits et sont plutôt situés à l'intérieur des terres, concentrés sur les plateaux de grès. Les milieux humides sont relativement rares dans les secteurs des buttes centrales. Environ 17 % des 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.



Un des quelques lacs de l'archipel.



Milieu humide typique des îles de la Madeleine.



HYDROGRAPHIE ET MILIEUX HUMIDES

Tourbière	Marais	Autre milieu humide	Cours d'eau permanent	Cours d'eau intermittent	Route nationale
Ombrotrophe (bog)	D'eau douce	Pré humide	Lac ou étang	Golfe du Saint-Laurent	Route locale
Minérotrophe (fen)	Saumâtre ou salé	Marécage			
Boisée	Indifférencé	Eau peu profonde			
Indifférenciée		Milieu humide indifférencié			

Sources :

- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Milieux humides : Comité ZIP des Îles (2020) ; Inventaire écoforestier du Québec méridionale, Ministère des Forêt, de la Faune et des Parcs (2021)
- Milieux humides potentiels : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2019)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Pédologie

La pédologie étudie la mise en place des sols et leurs propriétés. Connaître la composition du sol permet une meilleure compréhension des processus d'infiltration de l'eau et permet d'évaluer la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine.

Les données 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, a permis d'établir, pour chaque zone, la texture principale des sols. La capacité au drainage a aussi été établie à partir de plusieurs autres caractéristiques des sols.

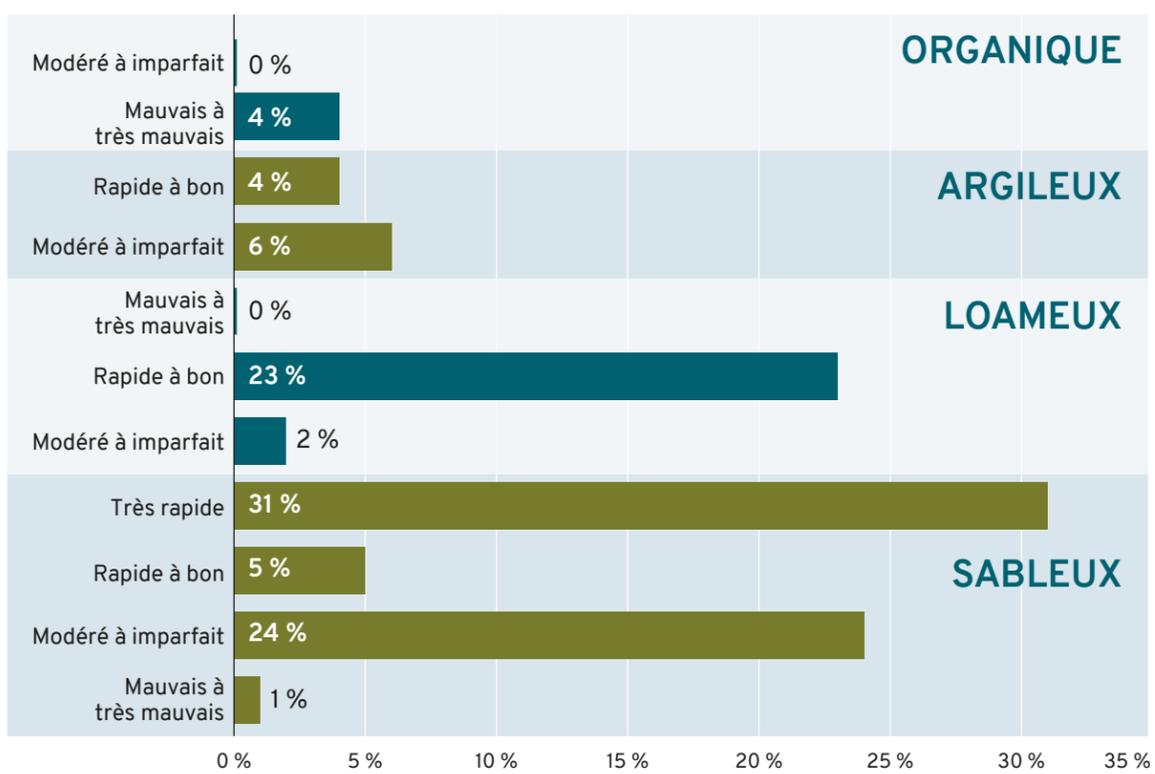
Les sols sableux dominent aux îles de la Madeleine et comptent pour environ **60 %** des types de sols

Les sols sableux dominent aux îles de la Madeleine et comptent pour environ 60 % des types de sols, suivis des sols loameux (25 %), des sols argileux (10 %) et des sols organiques (5 %). 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.

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.



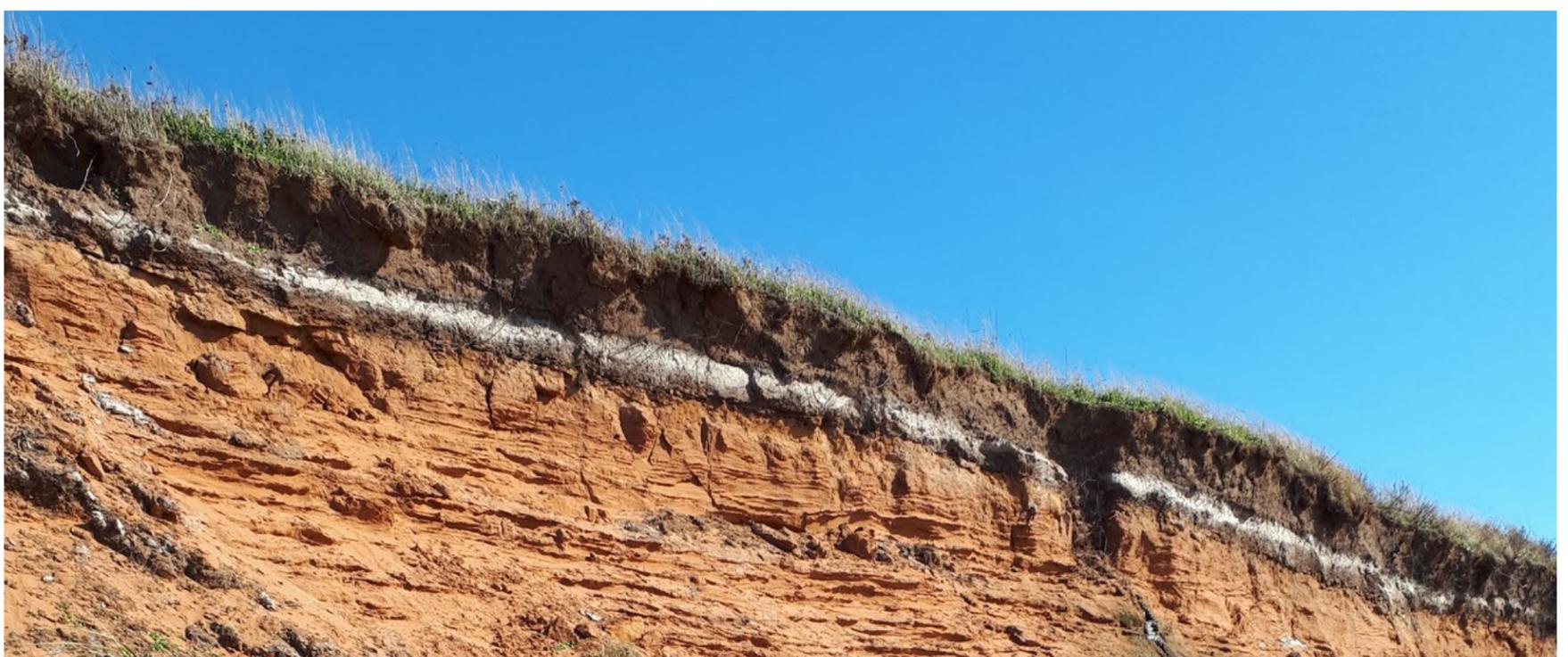
Sol organique, île d'Entrée.



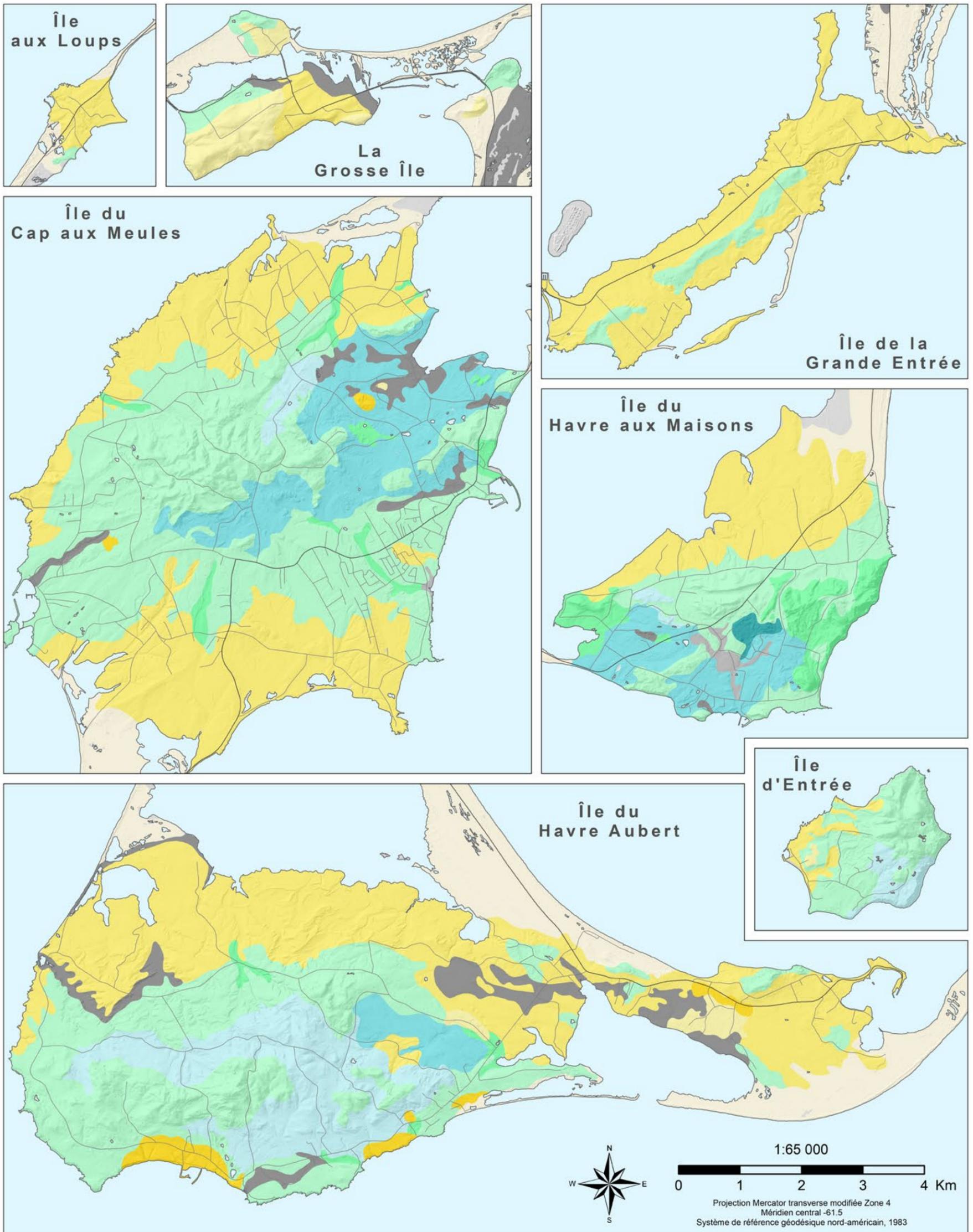
Proportion des types de sols, classés par texture et capacité au drainage.



Horizons de sol, plage de la Dune-de-l'Ouest, île du Havre Aubert.



Horizons de sol observés sur une plage située à l'ouest de l'île d'Entrée.



PÉDOLOGIE



Sources :

- Pédologie : Tardif, L. (1967). Pédologie des Îles-de-la-Madeleine, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
- Classification des sols : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (2009)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Climat

CLIMAT ACTUEL

Deux stations météorologiques sont actives aux îles de la Madeleine, toutes deux situées à l'aéroport sur l'île du Havre aux Maisons. Elles sont opérées par le Service météorologique du Canada d'Environnement et Changement climatique Canada et par NAV Canada, la société privée qui contrôle la circulation aérienne au pays. Des séries de mesures y sont disponibles depuis 1978. De par leur situation centrale sur l'archipel (l'ensemble du territoire d'étude se situe à moins de 37 km de ces stations météo), on considère leurs données météorologiques comme représentatives de l'ensemble du territoire d'étude. Les normales climatiques de la période 1981-2010 ont été calculées à ces stations par Environnement Canada.

La moyenne annuelle de la température de l'air est de 5,0°C aux îles de la Madeleine. 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.

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.

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.

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.

L'archipel reçoit en moyenne 236,8 cm de neige par année, avec un pic mensuel de 61,1 cm en janvier. 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.

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.

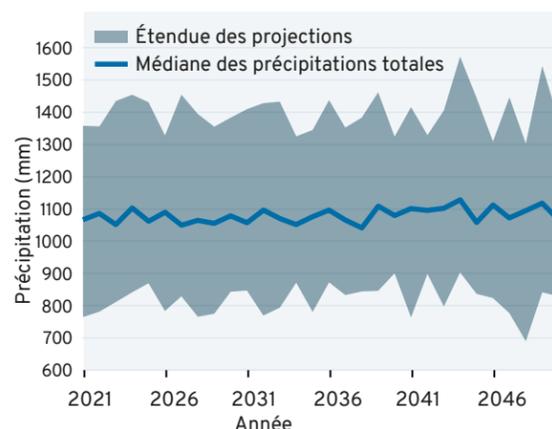
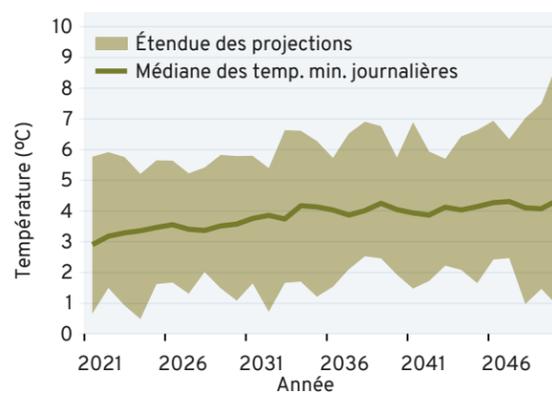
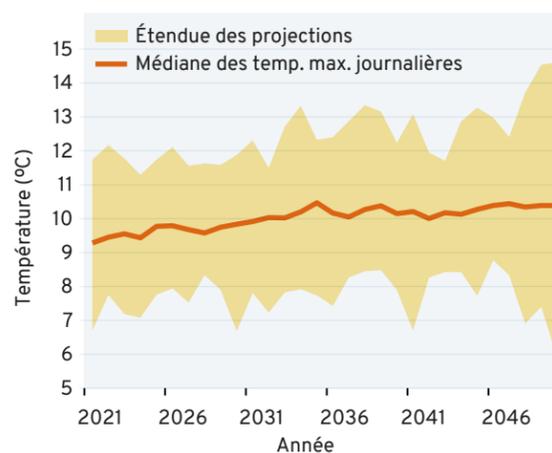
CLIMAT FUTUR

Afin d'évaluer le climat futur, 72 scénarios climatiques fournis par Ouranos (Charron, 2016) pour les 30 prochaines années ont été utilisés. Les projections sont comparées aux moyennes des données climatiques observées des 30 années les plus récentes aux deux stations météorologiques actives à l'île du Havre aux Maisons.

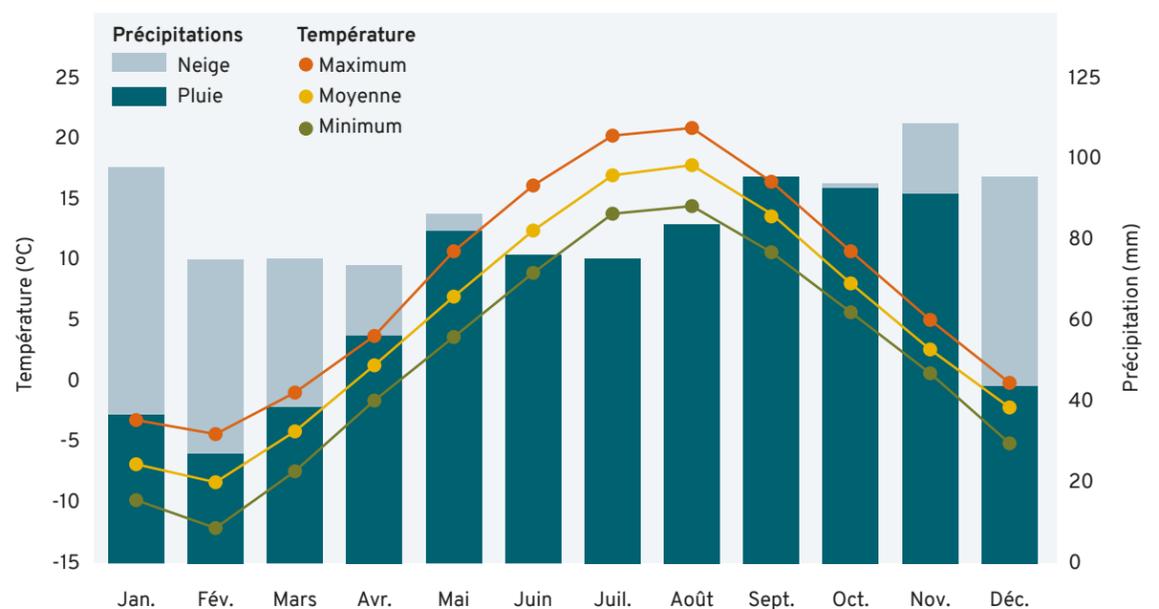
De 2021 à 2050, les changements des températures maximales journalières s'étalent, selon les différents scénarios, de -0,03 à +0,10°C/an, avec une hausse médiane de 0,03°C/an. Cette hausse médiane est identique à celle obtenue durant la période de référence. Selon la médiane des scénarios, la moyenne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



Projection des températures minimales et maximales journalières et des précipitations totales pour 2021 à 2050, selon 72 scénarios climatiques.



Température et précipitation des normales climatiques de 1981 à 2010 (neige en équivalent en eau).



Parc éolien de la Dune-du-Nord, entre l'île aux Loups et la Grosse Île.

Niveau de la mer et marée

Une seule station marégraphique, située au port de Cap-aux-Meules, est active aux îles de la Madeleine. Elle est opérée par Pêche et Océans Canada. Des mesures depuis 1964 y sont disponibles, à fréquence horaire et journalière.

ÉVOLUTION DU NIVEAU DE LA MER

La pente de la régression linéaire montre une hausse de 0,01 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).

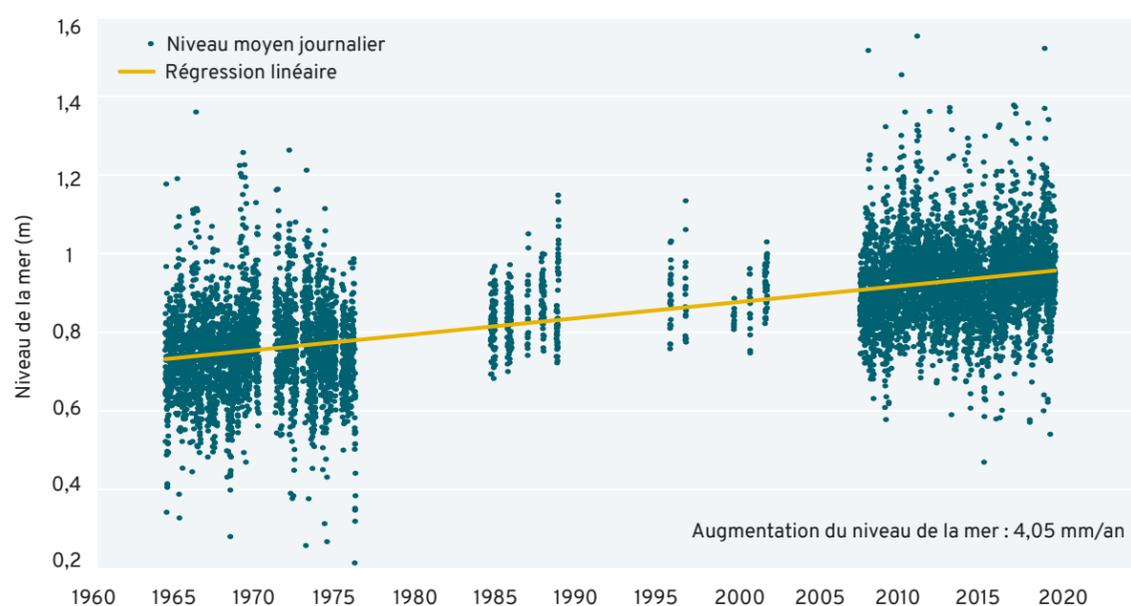
Selon le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2019), l'expansion thermique des océans, la fonte des glaciers et les changements dans l'emmagasinement de l'eau sur terre entraîneraient une hausse globale du niveau moyen des mers entre 0,29 m et 1,10 m d'ici 2100, comparativement 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 demeurerait 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 m \pm 0,12 m d'ici 2050.

MARNAGE

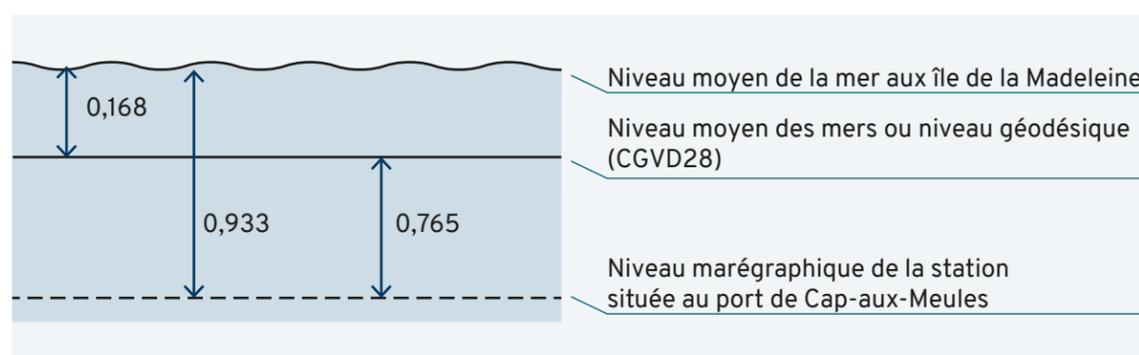
Les niveaux horaires mesurés au port de Cap-aux-Meules permettent de déterminer un marnage journalier moyen de 0,70 m, avec un niveau moyen à marée basse de 0,46 m, variant de -0,45 à 1,18 m, et un niveau moyen à marée haute de 1,16 m, variant de 0,36 à 2,38 m.

RÉFÉRENCE DU MILIEU MOYEN DE LA MER

L'élévation du sol est rapportée par rapport au niveau moyen des mers de la référence altimétrique CGVD28, communément appelé 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 au port de Cap-aux-Meules 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.



Niveau moyen journalier de la mer de 1964 à 2019.



Calcul du niveau moyen de la mer aux îles de la Madeleine.



Plage en hiver.

Couverture végétale

Les végétaux qui recouvrent le sol, incluant leur densité et leur maturité, sont des éléments déterminants du bilan hydrologique de surface. En effet, les végétaux utilisent l'eau pour leur croissance, en la captant par leurs feuilles ou leurs racines, et en la rejetant dans l'atmosphère par transpiration.

Les données cartographiques du couvert forestier proviennent de l'Inventaire écoforestier du Québec méridional, du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Pour les zones sans couvert forestier, ce sont les données cartographiques sur l'utilisation du territoire du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques qui ont été utilisées.

Environ les trois quarts des îles de la Madeleine, soit 146 m², sont occupés par une couverture forestière. 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 végétale 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.

Superficie des classes de couverture forestière (type écologique)

Couverture forestière	Superficie (km ²)	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	0,6
Total	146,0	100,0

Occupation du sol

La connaissance de l'occupation du sol sur le territoire permet d'identifier les secteurs où les activités humaines sont susceptibles d'exercer une menace sur la ressource en eau souterraine et d'en modifier la qualité ou la quantité. L'occupation du sol influence aussi le bilan hydrologique, par exemple les secteurs urbains favorisent le ruissellement de surface comparativement aux milieux naturels.

Les données cartographiques de l'utilisation du territoire sont issues du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et sont représentatives de l'année 2018.

La classe d'occupation du sol dominante est la forêt, couvrant 59,7 km², représentant 32 % du territoire. Celle-ci est concentrée sur les buttes centrales qui sont moins développées. La classe de coupe et régénération, beaucoup moins importante, avec 1,6 km², 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 km², correspondant à 23 % 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 plateaux de grès. Le sol nu et lande est la troisième occupation couvrant le plus de territoire, soit 40,5 km², équivalent à 22 % du territoire. Elle correspond principalement aux cordons dunaires, qui sont aussi occupés par les milieux humides, qui couvrent 21,9 km², soit 12 % du territoire. La classe agricole, de 14,0 km², soit 8 % du territoire d'étude, se situe à proximité des secteurs anthropiques, sur les plateaux de grès. Enfin, le milieu aquatique, excluant l'eau salée, occupe 6,7 km², ce qui correspond à 4 % du territoire.

Superficie des classes d'occupation du sol

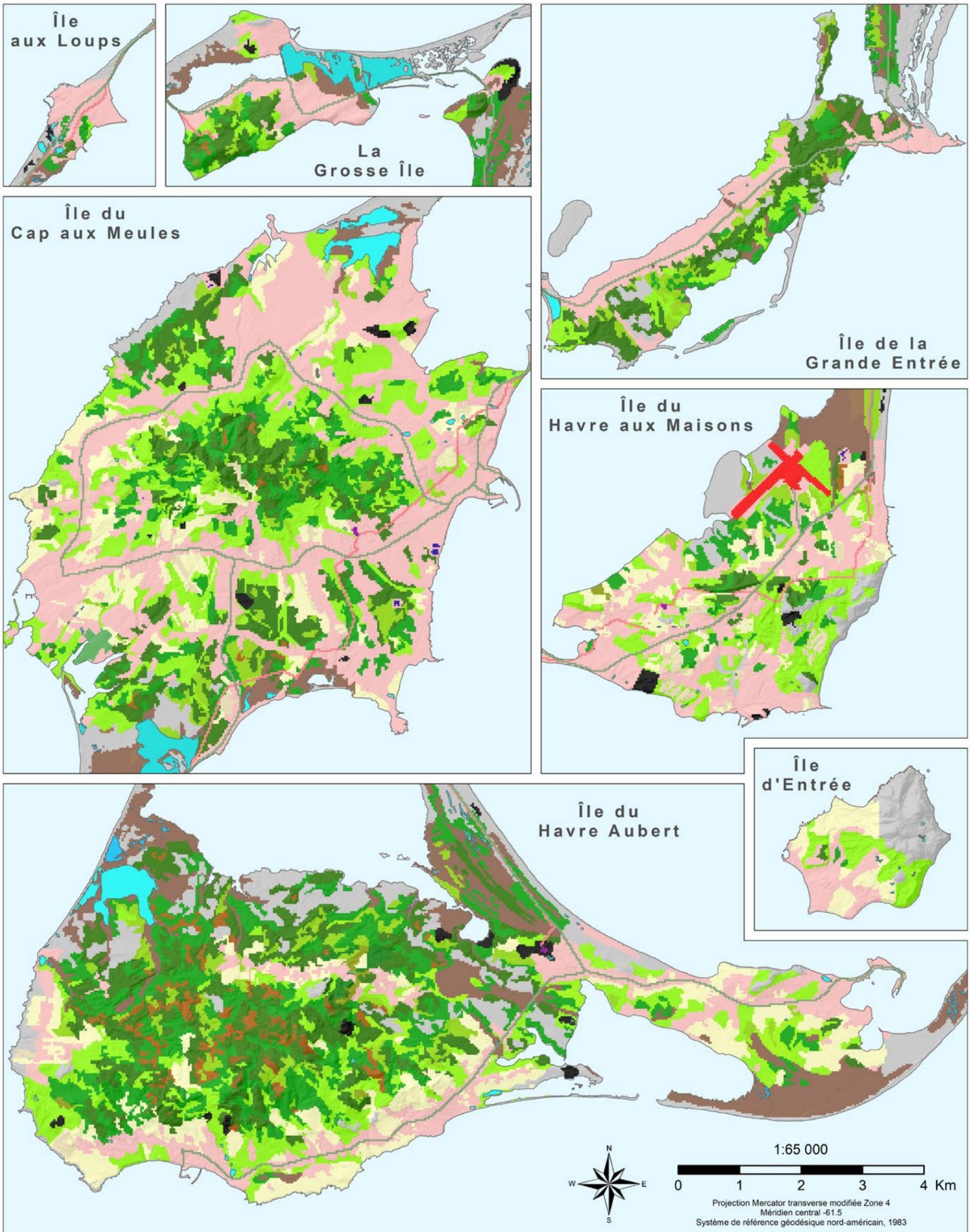
Classe	Superficie (km ²)	Proportion (%)
Forestier	59,7	32,0
Anthropique	42,2	22,6
Sol nu et lande	40,5	21,7
Milieu humide	21,9	11,7
Agricole	14,0	7,5
Aquatique	6,7	3,6
Coupe et régénération	1,6	0,9



Couvert forestier, île du Cap aux Meules.



Lande herbacée, île du Havre aux Maisons.



OCCUPATION DU SOL

Agricole	Carrière ou gravière	Aquatique	Forestier	Humide
Agriculture indifférenciée	Carrière ou gravière	Cours d'eau	Arbuste	Marais
Culture pérenne et pâturage	Golf	Eau	Arbuste bas	Tourbière
Vignoble	Ligne de transmission ou de transport d'énergie	Eau salée	Arbuste haut	Non classifié
Anthropique	Mine et déchet de mine	Lac	Forêt de conifères dense	Territoire non photo-interprété
Aéroport	Route ou chemin	Mare et/ou eau peu profonde	Forêt de conifères ouverte	Sol nu et lande
Bassin de filtration, de décontamination, de déchets liquides, etc.	Zone développée	Coupe et régénération	Forêt mixte dense	Sol nu, roc-sol à nu, sol dénudé ou semi-dénudé sec
	Zone industrielle et commerce	Coupe forestière	Forêt mixte ouverte	
		Perturbation naturelle		

Sources :

- Utilisation du territoire : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Affectation du territoire

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). Elle indique formellement comment une municipalité ou une MRC entend utiliser son territoire. Elle peut être utilisée pour la gestion durable des eaux souterraines, notamment en contrôlant les activités permises en zones vulnérables et qui pourraient influencer sur la qualité de la ressource.

Les zonages municipaux de 2019 pour la Municipalité de Grosse-Île et de 2020 pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine ont été utilisés pour cartographier les affectations du territoire de l'archipel. Le périmètre urbain du Portrait provincial en aménagement du territoire du ministère des Affaires municipales et de l'Habitation a été superposé.

L'affectation de conservation domine, couvrant 82 km², ce qui représente 40 % du territoire d'étude. 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 km², ce qui correspond à 22 % du territoire. Les habitations sont peu concentrées et sont réparties un peu partout sur les îles. La combinaison des affectations urbaines et de noyaux villageois ne fait d'ailleurs que 4,7 km², 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 km², soit 18 % du territoire. Elle est concentrée sur les buttes centrales. L'affectation agricole n'est pas négligeable, avec 22,3 km² en superficie, ce qui représente 11 % du territoire. Elle avoisine les affectations résidentielles, sur les plateaux de grès. Les affectations industrielles, couvrant 6,3 km², 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 publiques, récréatives et de villégiature complètent le portrait, occupant une superficie combinée de 7,2 km², correspondant à 3 % du territoire.

Superficie des affectations du territoire

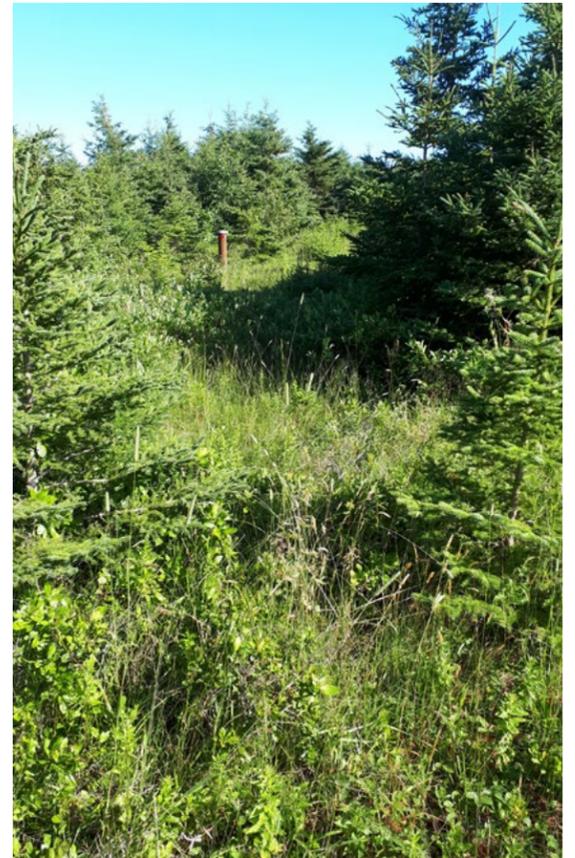
Zonage	Superficie (km ²)	Proportion (%)
Conservation	82,0	40,6
Résidentiel	44,0	21,8
Forestier	35,6	17,6
Agricole	22,3	11,0
Industriel	6,3	3,1
Public	3,8	1,9
Noyau villageois	3,3	1,6
Villégiature	2,2	1,1
Urbain	1,4	0,7
Récréatif	1,2	0,6

Aires protégées

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).

Les données cartographiques sont issues du Registre des aires protégées compilé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Les aires protégées du territoire d'étude totalisent 30,8 km² 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 km², 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 km², 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 km², sont situés le long du cordon dunaire à l'ouest de la baie du Havre aux Basques.



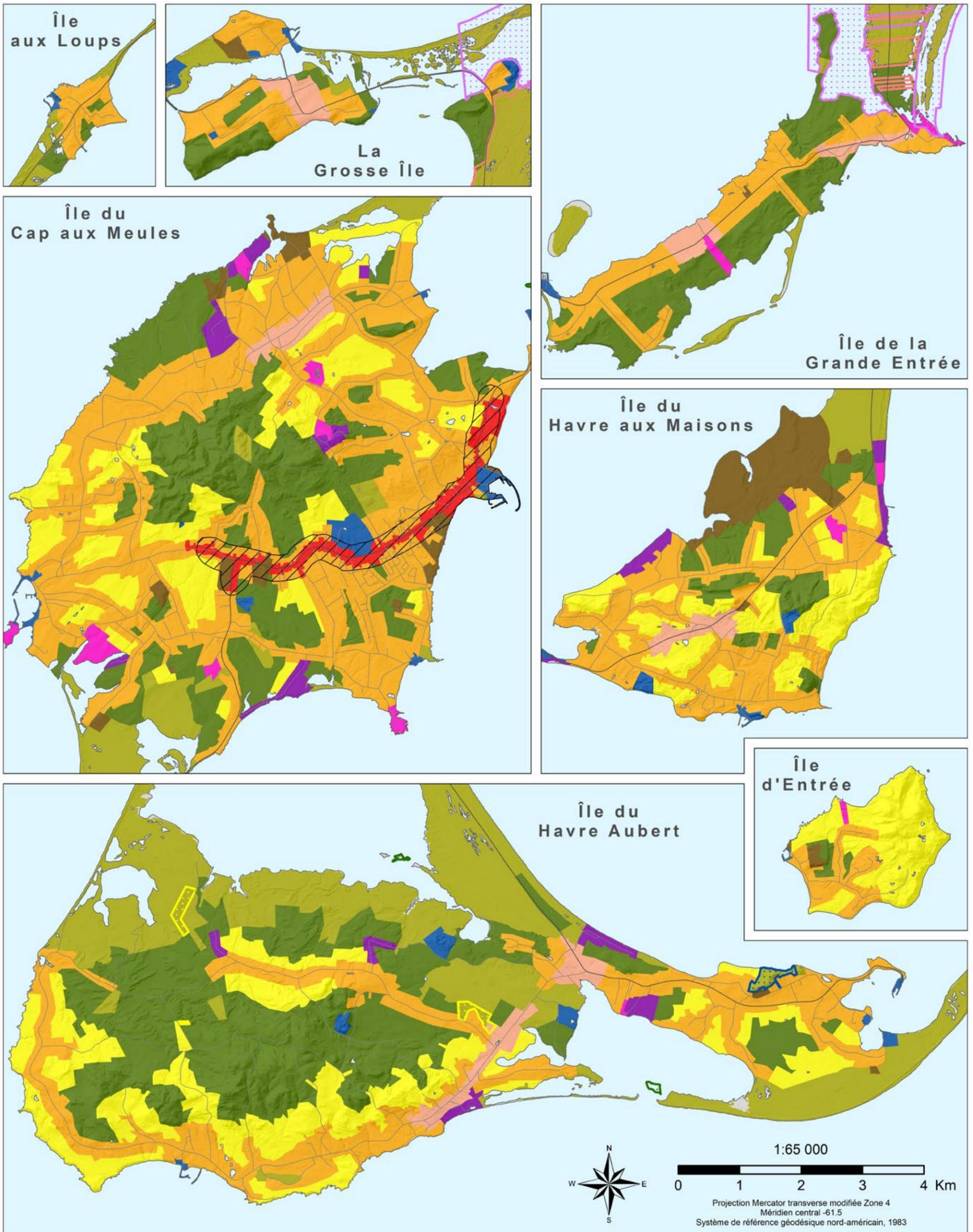
Puits situé en zone forestière, île du Cap aux Meules.



Zone agricole.



Zone résidentielle, île du Havre Aubert.



AFFECTATION DU TERRITOIRE

Zonage municipal

 Agricole	 Conservation
 Résidentiel	 Forestier
 Noyau villageois	 Public
 Urbain	 Récréatif
 Industriel	 Villégiature

 Périmètre urbain
 Route nationale
 Route locale
 Plan d'eau

Aires protégées

 Habitat faunique
 Refuge faunique
 Réserve naturelle reconnue
 Réserve nationale de faune
 Milieu naturel de conservation volontaire

Sources :

- Zonage municipal : Municipalité Les Îles-de-la-Madeleine (2020) ; Municipalité de Grosse-Île (2019)
- Périmètre urbain : Portrait provincial en aménagement du territoire, Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (2018)
- Aires protégées : Registre des aires protégées, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2021)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Exploitation des eaux souterraines

Systèmes de distribution en eau potable

Cinq systèmes municipaux de distribution en eau potable sont présents sur les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons, de la Grande Entrée et de l'île d'Entrée. Ces systèmes exploitent l'eau souterraine à l'aide de 38 puits de pompage. Sept puits supplémentaires sur l'île du Cap aux Meules sont non opérés, car non connectés au réseau de distribution.

Au total, ce sont 11 354 résidents permanents qui sont desservis par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Le reste des 12 774 résidents permanents de l'archipel, 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.

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

11 354 résidents permanents sont desservis en eau potable par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine.

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.

DÉBIT DE POMPAGE

Les rapports journaliers de débit de chacun des puits de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine ont permis de reconstituer les chroniques des débits de pompage pour la période de 2002 à 2020. Les débits d'exploitation moyens annuels ont été calculés pour tous les puits de pompage. Ceux-ci varient d'environ 75 à 300 m³/jour sur les îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert et du Havre aux Maisons. Sur l'île de la Grande Entrée, le système de distribution plus récent a été mis en marche en 2013 et les débits de pompage ne sont disponibles que pour la période de 2014 à 2020. Les débits y sont nettement plus faibles, au maximum 25 m³/jour sur une base annuelle.

Les débits moyens journaliers de chaque système de distribution ont aussi été calculés, en moyennant les débits de tous les puits d'une île pour chaque jour des mêmes périodes que

ci-dessus. 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.

AIRE DE PROTECTION

Afin de réduire le risque de contamination des puits de pompage municipaux, quatre aires de protection sont établies. Elles limitent les activités permises dans ces secteurs, afin d'assurer la qualité de l'eau en cas, par exemple, de déversements accidentels.

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 puits de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine par l'Université Laval (Tremblay et coll., 2022) dans le cadre d'un projet conjoint au *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*.

Pour le puits HQ-2 de l'île d'Entrée qui dessert **moins de 500 personnes**, la réglementation impose des aires de protection aux rayons fixes suivants :

- Immédiate: 30 m
- Intermédiaires bactériologiques: 100 m
- Intermédiaires virologiques: 200 m
- Éloignée: 2 km orienté vers l'amont hydraulique

Pour tous les autres puits, qui alimentent **500 personnes ou plus** et au moins une résidence, les aires de protection sont définies de la manière suivante :

- Immédiate: rayon fixe de 30 m autour du prélèvement
- Intermédiaires bactériologiques: temps de parcours de l'eau souterraine dans l'aquifère de 200 jours
- Intermédiaires virologiques: temps de parcours de l'eau souterraine dans l'aquifère de 550 jours
- Éloignée: 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

Une modélisation numérique des écoulements d'eau souterraine a été réalisée pour déterminer les aires de protections intermédiaires et éloignées (Tremblay et coll., 2022). 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. 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.

Systèmes de distribution en eau potable municipaux

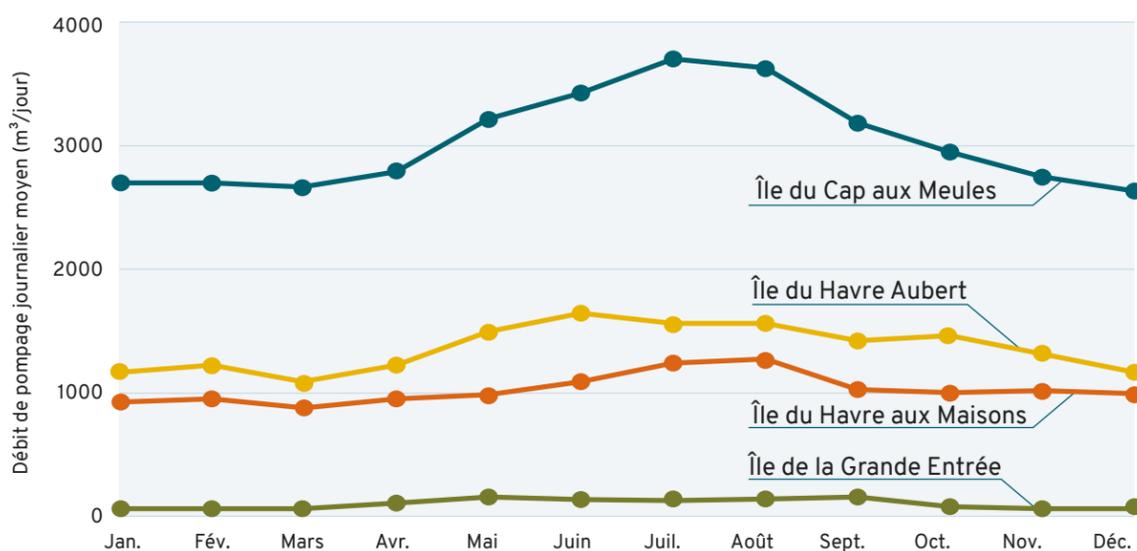
Île	Nombre de puits en opération	Population totale desservie	Longueur du réseau d'aqueduc (km)
Cap aux Meules	18	6 643	115
Grande Entrée	9	507	6,5
Havre aux Maisons	6	1 921	38
Havre Aubert	4	2 248	48
Entrée	1	35	0,5
Total	38	11 354	208



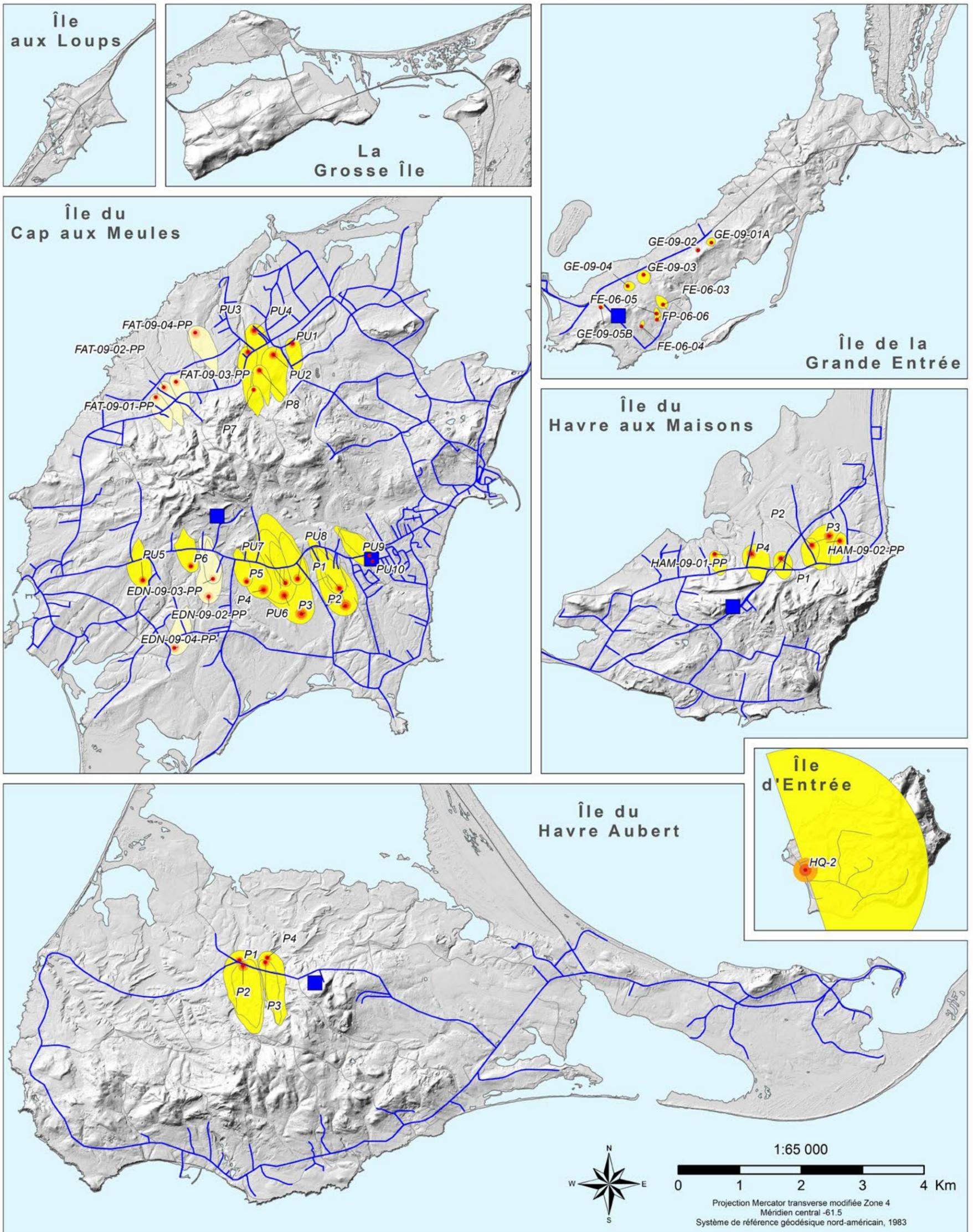
Puits HAM-09-02-PP, île du Havre aux Maisons.



Aire de protection immédiate clôturée du puits P3, île du Havre Aubert.



Débit de pompage journalier moyen pour chaque île sur une année.



SYSTÈMES MUNICIPAUX DE DISTRIBUTION EN EAU POTABLE

- | | | | |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------|
| • Puits municipal | Aire de protection de puits en opération | Aire de protection de puits non opéré | — Route nationale |
| ■ Réservoir | ■ Immédiate | ■ Immédiate | — Route locale |
| — Conduite d'aqueduc | ■ Intermédiaire bactériologique | ■ Intermédiaire bactériologique | — Plan d'eau |
| | ■ Intermédiaire virologique | ■ Intermédiaire virologique | |
| | ■ Éloignée | ■ Éloignée | |

Sources :

- Puits municipaux et réseaux de distribution en eau potable : Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (2021)
- Aires de protection des puits : Tremblay et coll. (2022). Rapport d'analyse de la vulnérabilité de la source pour les prélèvements d'eau souterraine de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Usage de la ressource

La connaissance des usages de l'eau 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 sont nécessaires.

Comme présenté précédemment, les volumes d'eau prélevés par les réseaux de distribution d'eau potable sont bien documentés, contrairement aux volumes d'eau utilisés pour les activités humaines. Ainsi, dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, la consommation de l'eau actuelle et projetée en 2050 a été estimée pour les secteurs d'activité résidentiel et agricole, ainsi que les secteurs industriel, commercial et institutionnel combinés.

ESTIMATION DE LA CONSOMMATION ACTUELLE

L'usage de la ressource présentée dans cette section concerne exclusivement la consommation

annuelle de l'eau douce souterraine. Elle inclut à la fois l'eau potable distribuée par la municipalité, 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.

Il est estimé qu'environ 2,2 Mm³ d'eau douce est consommé annuellement aux îles de la Madeleine, tous usages confondus, dont près de 93 % (2,0 Mm³) provient des réseaux de distribution municipaux. Plus de la moitié (62 %) de la consommation d'eau se fait sur l'île du Cap aux Meules, la plus peuplée. À l'inverse, sur l'île d'Entrée, la moins peuplée, on n'utilise qu'à peine 0,1 % de l'eau consommée de l'archipel.

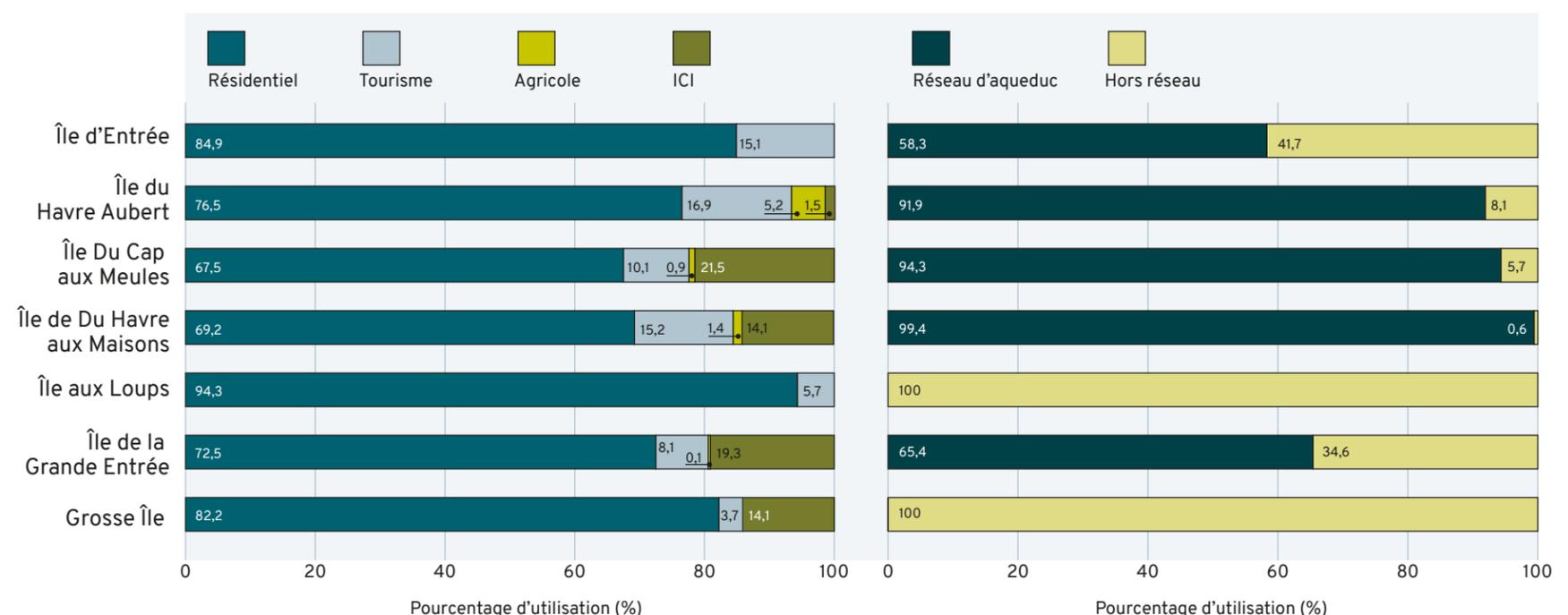
Environ **2,2 Mm³** d'eau douce est consommé annuellement aux îles de la Madeleine.

L'île du Cap aux Meules montre le volume d'eau le plus important utilisé par les industries, commerces et institutions dû à leur nombre plus élevé que sur les autres îles. Les nombreuses infrastructures touristiques, le centre hospitalier, la polyvalente des îles et les 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.

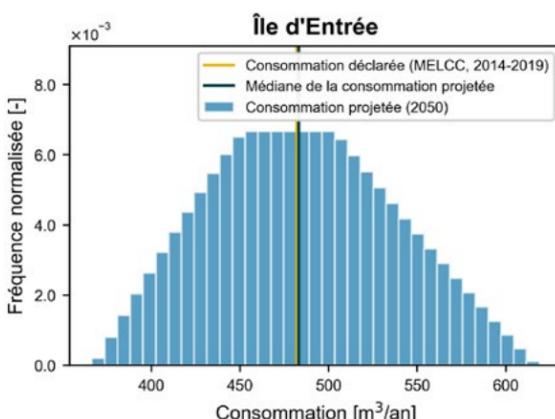
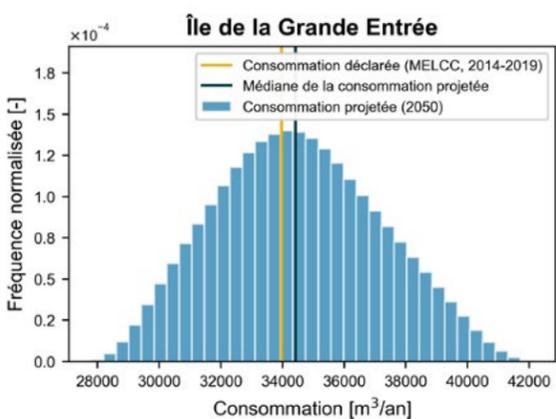
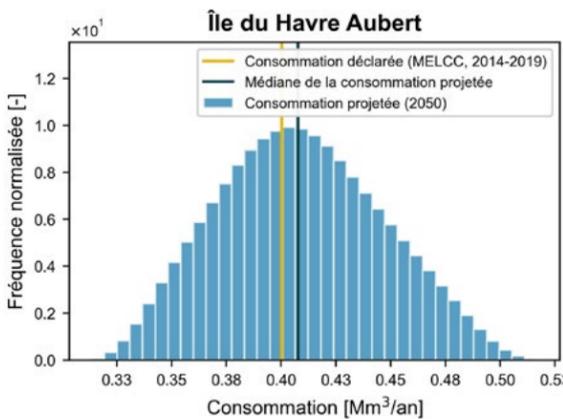
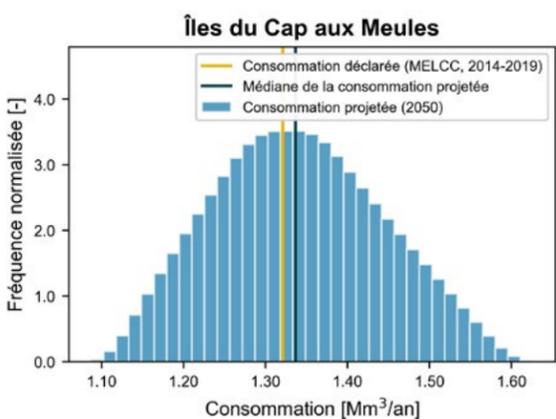
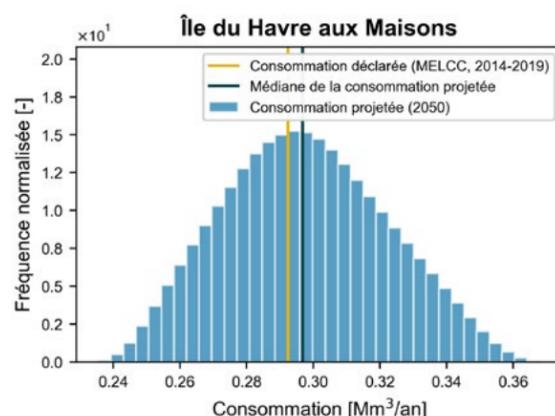
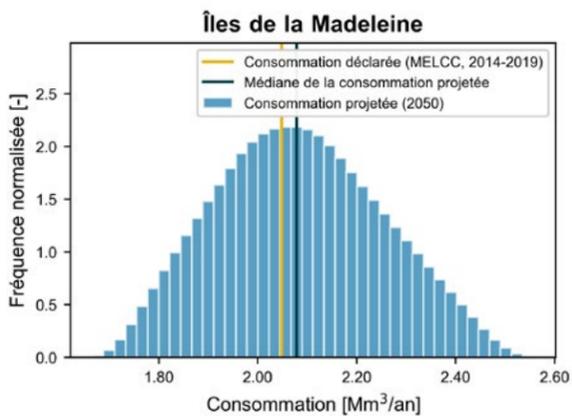
La consommation en eau résidentielle, incluant les résidents permanents et non permanents, constitue nettement le secteur consommant le plus d'eau, de 77 à 100 % de la consommation totale des différentes îles. Les résidents non permanents représentent entre 9 et 18 % de la consommation en eau résidentielle 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.

Estimation de l'usage de l'eau (en m³/an)

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



Proportion de l'usage de l'eau pour les différentes îles, selon les secteurs d'activité et la source d'approvisionnement.



Distribution de probabilité de la consommation projetée des systèmes de distribution d'eau potable en 2050.

CONSOMMATION FUTURE

À partir des estimations de la consommation actuelle, 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. 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 industriel, commercial et institutionnel causant une variation de consommation d'eau, les estimations actuelles ont été reprises dans les projections. Ainsi, les scénarios considèrent que seule la consommation du secteur résidentiel fluctuera dans le futur.

Les résultats de l'analyse montrent que la médiane de la consommation en eau projetée est plus élevée de 1,5 % par rapport à la consommation d'eau actuelle de 2,0 Mm³/an pour les réseaux de distribution municipaux. Le scénario de projections maximal indique un volume de demande en eau dépassant 2,5 Mm³/an, ce qui correspondrait à une augmentation d'environ 25 %. À l'inverse, le scénario minimal de 1,7 Mm³/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.



Falaise rocheuse de grès rouge, île du Cap aux Meules.

Contexte géologique

Géologie du socle rocheux

Les îles de la Madeleine se situent au centre d'une vaste cuvette sédimentaire, nommée Bassin Madeleine, localisée sur la partie sud du Golfe du Saint-Laurent et qui touche au Nouveau-Brunswick et à l'Île-du-Prince-Édouard. Le bassin couvre une superficie d'environ 165 000 km², dont 65 000 km² sont émergés. Le socle rocheux de l'archipel est principalement constitué de roches sédimentaires (grès, conglomérats, calcaire) accompagnées de roches volcaniques (basaltes) qui témoignent de l'histoire géologique de la région.

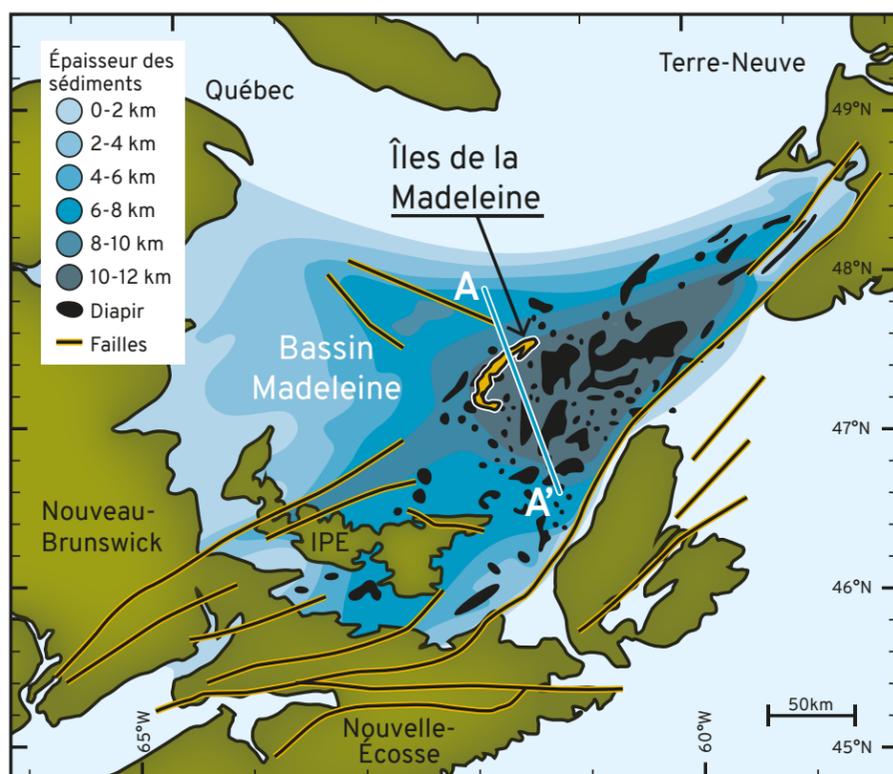
GÉOLOGIE RÉGIONALE

Afin de mieux comprendre la mise en place des roches aux îles de la Madeleine, il faut remonter il y a plus de 340 millions d'années. Les continents n'avaient pas encore la forme qu'on leur connaît aujourd'hui et le climat était différent.

Les îles de la Madeleine ont pris forme sous une ancienne mer, sillonnant l'intérieur d'un ancien continent, Laurentia. À cette époque, ce bras de mer peu profond était situé près de l'équateur sous un climat tropical. 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).

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, la température globale de la Terre était nettement supérieure à la température actuelle en raison d'une concentration élevée en CO₂ dans l'atmosphère, ce qui favorisait l'évaporation.

Par la suite, l'enfoncement progressif 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. Il s'agit de boues fossilifères ou de sédiments terrigènes provenant de l'érosion des chaînes de montagnes adjacentes. Ces sédiments 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 entre 298 et 252 millions d'années. 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.

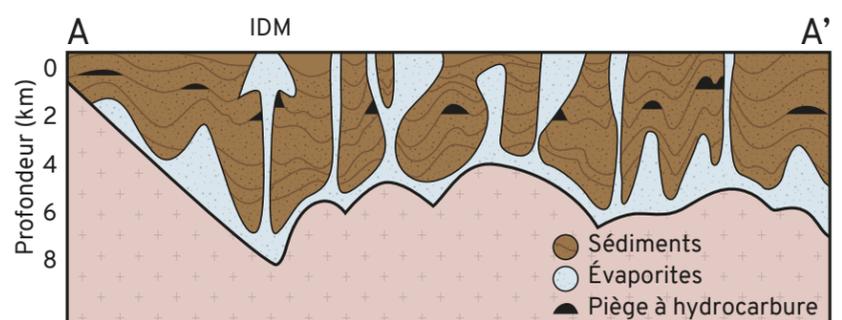


Évaporite: roche sédimentaire composée de sels minéraux, formée par l'évaporation de l'eau

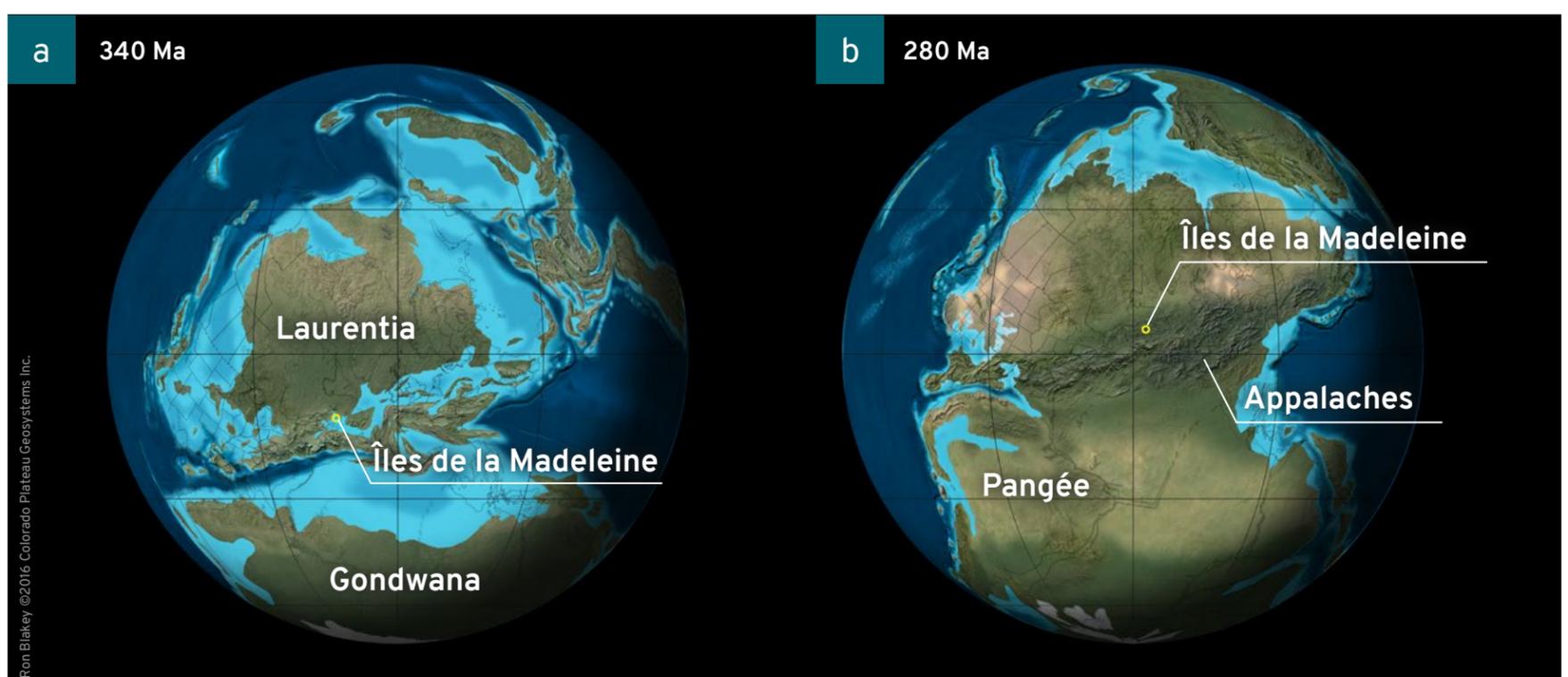
Diapir: formation de sel ayant remonté vers la surface

Discordance: coupure dans les dépôts géologiques attribuable à une absence de sédiments ou à leur érosion

Lors de l'accumulation progressive des sédiments, 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. Leur densité est éventuellement devenue supérieure à la densité des évaporites. En raison de ce contraste de densité, et en raison de leur comportement visqueux attribuable aux pressions et températures élevées



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).



Position des continents durant la formation des îles de la Madeleine a) Localisation des îles de la Madeleine au Carbonifère, il y a 340 Ma. Celles-ci 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.

où elles étaient enfouies, les évaporites ont commencé à se propager vers la surface par flottation. Ainsi, d'immenses cheminées de sel, appelées **diapirs**, se sont formées en même temps que les sédiments s'accumulaient.

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. Le noyau rocheux de plusieurs des îles de l'archipel est composé de diapirs qui peuvent y atteindre près de 5 km d'épaisseur. 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.

Géologie des îles de la Madeleine

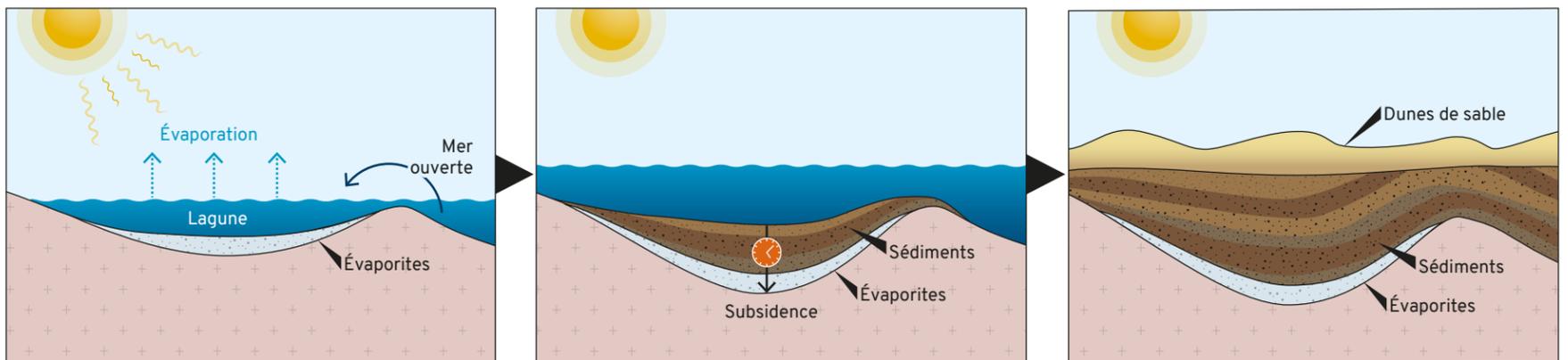
Aux îles de la Madeleine, quatre unités géologiques ont été observées à la surface. Il s'agit des formations du Havre aux Maisons et du Cap au Diable, ainsi que des membres de l'Étang-du-Nord et de l'Étang-des-Caps, regroupés dans la Formation du Cap aux Meules.

Ces quatre unités géologiques sont regroupées en deux assemblages, séparés par une **discordance**.

Les données proviennent de la cartographie de Brisebois (1981), obtenues du Système d'information géominère du ministère de l'Énergie et

des Ressources naturelles. Les données comprennent aussi les structures géologiques présentes, comme les failles, et les emplacements des affleurements, soit où le socle rocheux est visible à la surface.

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 horsts (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.

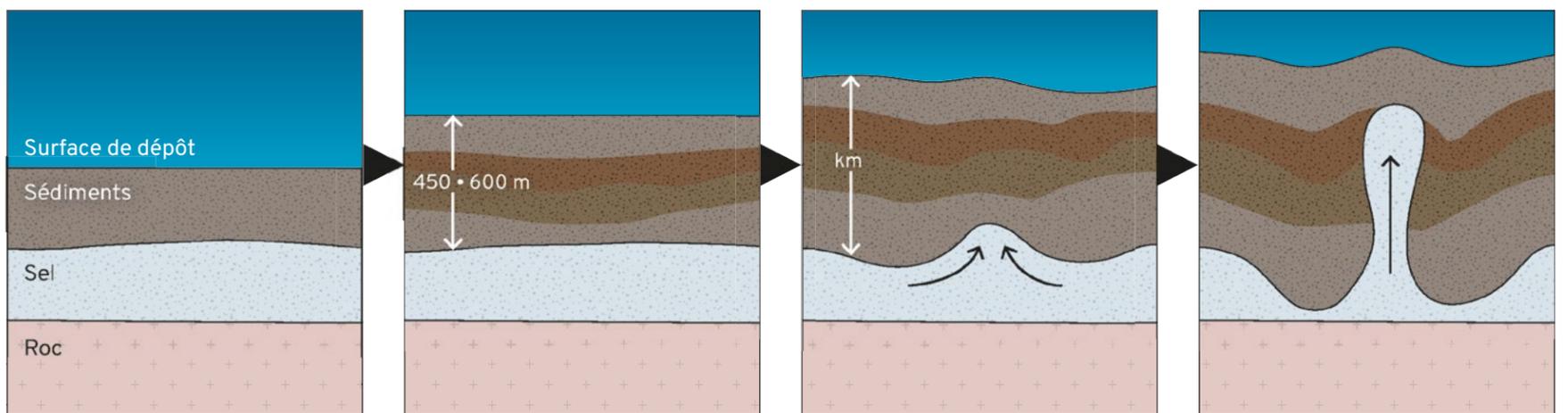


Il y a 350 Ma, le site des îles de la Madeleine se situait près de l'équateur. Des évaporites se sont déposées dans une lagune tropicale.

Durant plusieurs millions d'années il y a eu une accumulation d'une importante épaisseur de sédiments marins dans le bassin sédimentaire en subsidence.

Il y a 280 Ma, le bassin sédimentaire a émergé et des dépôts de sable dunaire se sont formés dans un environnement désertique.

Schéma chronologique expliquant le contexte géologique des îles de la Madeleine.



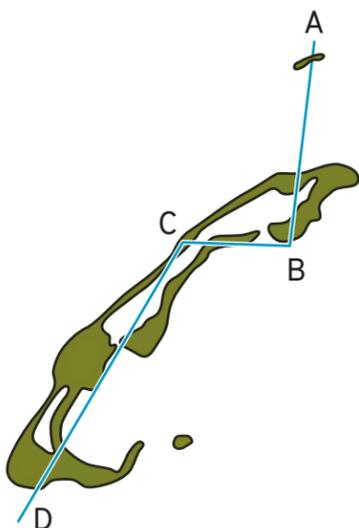
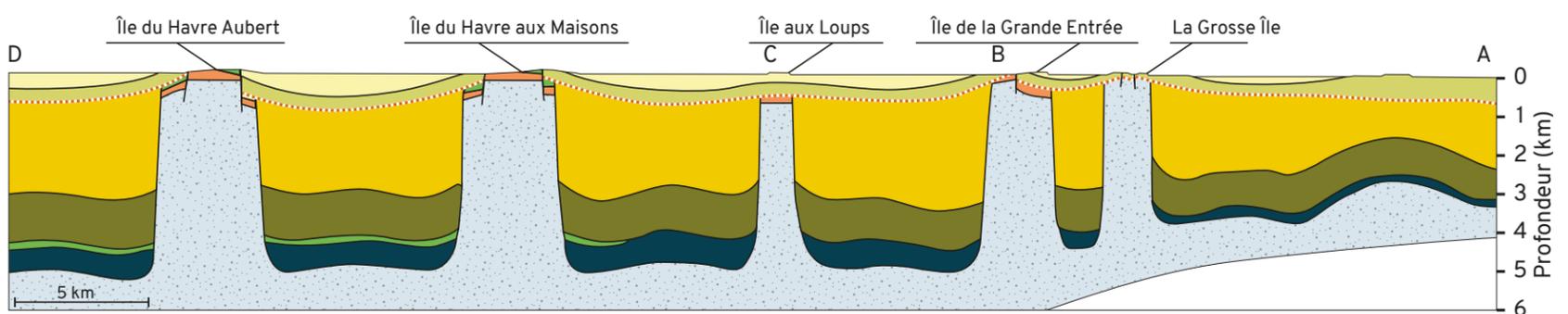
Des sédiments s'accumulent au-dessus d'une couche d'évaporite (sel).

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.

Les sédiments se transforment en roche et leur densité devient supérieure à celle du sel. Le sel commence à fluer.

Le sel remonte vers la surface par flottation et forme des diapirs de sel. Leur remontée cause la déformation des roches adjacentes.

Diagramme schématisant la formation des diapirs. Adapté de Bourque (2010).



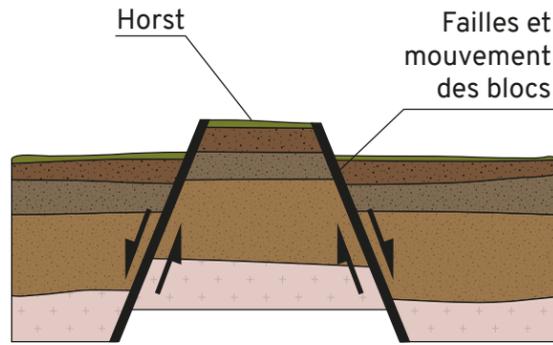
Âge (Ma)	Période	Groupe	Formation	Membre	Lithologie
280	Permien	Non défini	Cap aux Meules	Étang-des-Caps	Grès éoliens
290				Étang-du-Nord	Grès, mudstones et conglomérat
300	Carbonifère	Pictou	Cap au Diable		Roches volcaniques
310		Cumberland			
310		Riversdale			
320		Canso			
330	Windsor	Havre aux Maisons		Brèches	
340				Terrigènes, calcaires et évaporites	
				Sel	

Coupe géologique schématisée des îles de la Madeleine et colonne stratigraphique (adapté de Brisebois, 1981).

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. Leur formation a causé la déformation des roches encaissantes de la Formation du Cap aux Meules.

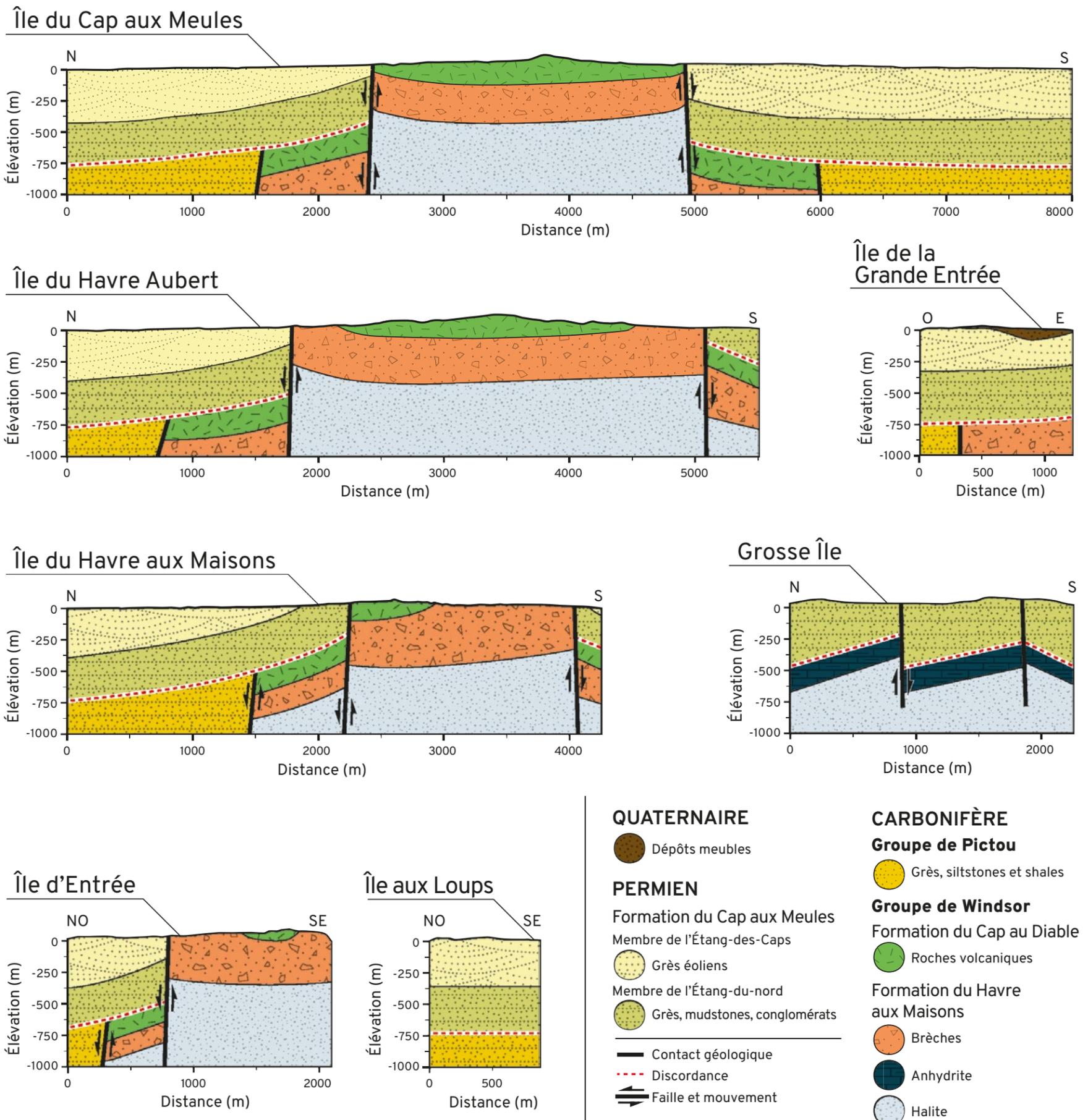
Horst: Structure tectonique constituée par des failles et entraînant un bloc de roche vers le haut.



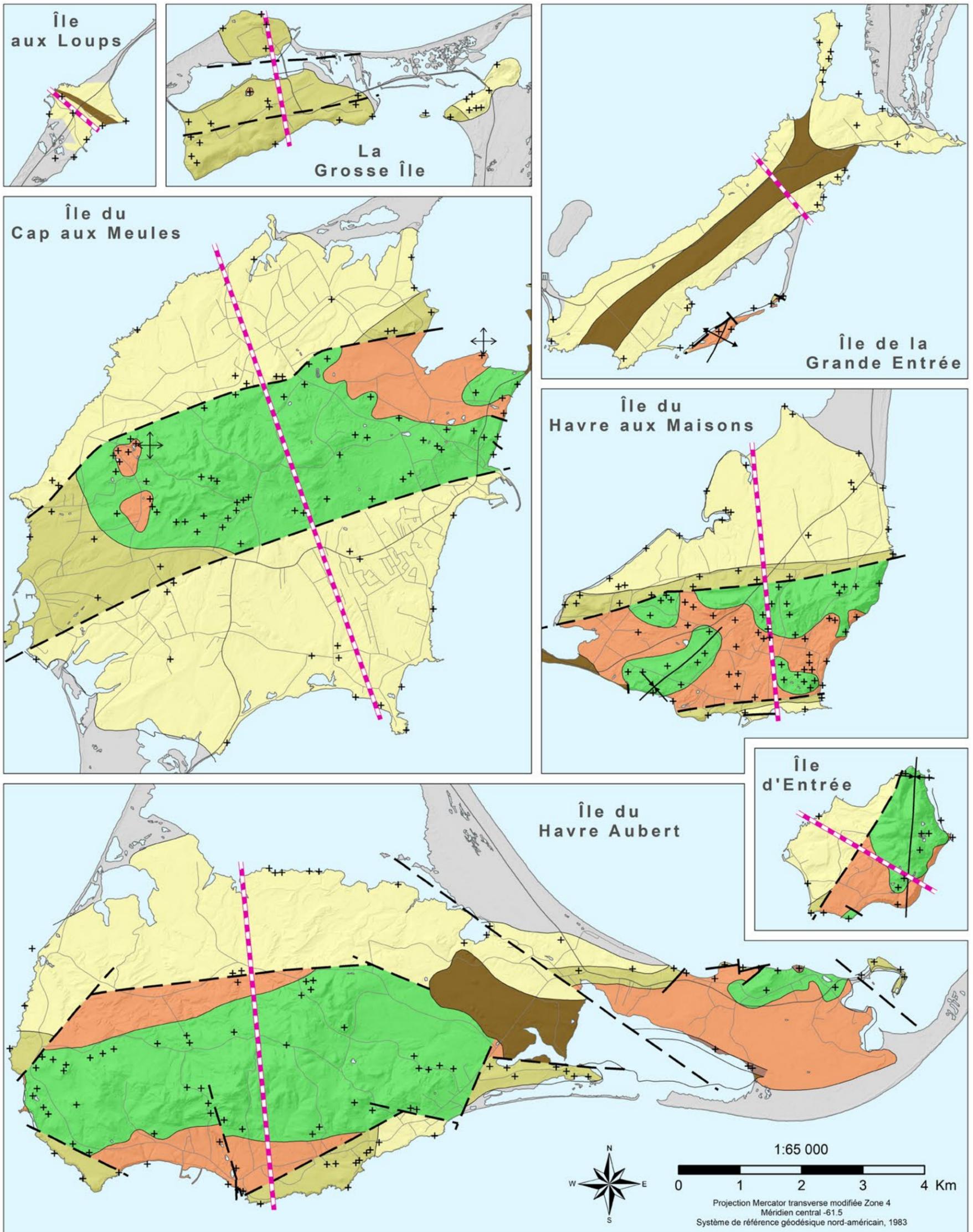
Coupe schématique illustrant la formation d'un horst.



Buttes formées par un horst, île du Havre aux Maisons.



Coupes géologiques. Les traces des coupes sont montrées à la carte *Géologie du socle rocheux*.



GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX

- | | | | |
|--|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Tomboles de sable Dépôts chenalisés de gravier, sable, silt, argile | <ul style="list-style-type: none"> Dykes et stocks de gabbro | <ul style="list-style-type: none"> Route nationale Route locale Plan d'eau Trace de coupe géologique + Affleurement rocheux ↕ Dôme de gypse Contact géologique | <ul style="list-style-type: none"> Faille certaine Faille probable ⊕ Synclinal ⊖ Anticlinal |
| <p>FORMATION DU CAP AUX MEULES
Membre de l'Étang-des-Caps</p> <ul style="list-style-type: none"> Grès et siltstones à laminations obliques géantes <p>Membre de l'Étang-du-Nord</p> <ul style="list-style-type: none"> Grès, siltstones, mudstones, conglomérats et calcaires | <p>FORMATION DU CAP AU DIABLE</p> <ul style="list-style-type: none"> Basalte, roches pyroclastiques, calcaire cristallin (marbre) <p>FORMATION DU HAVRE AUX MAISONS</p> <ul style="list-style-type: none"> Brèche d'effondrement, mudstones, grès, siltstones, calcaires, dolomies, gypse, anhydrite, basaltes, roches volcanoclastiques | | |

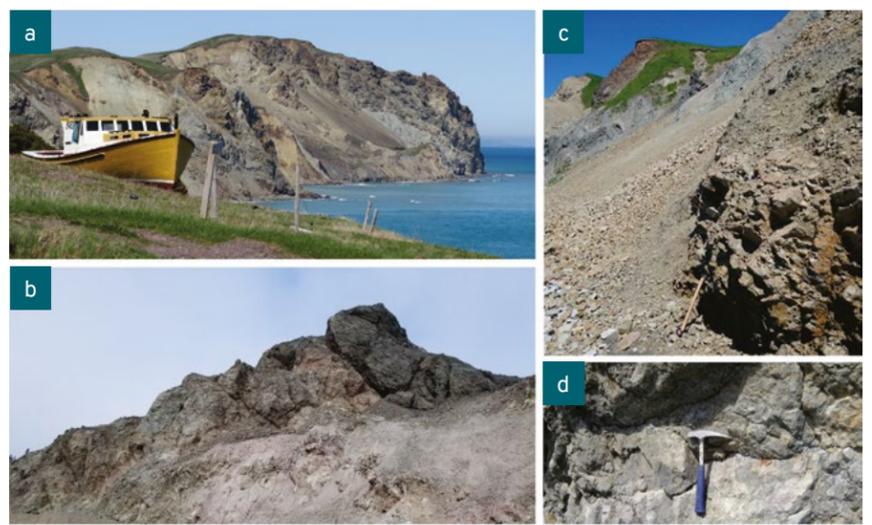
Sources

- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produit dérivé des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

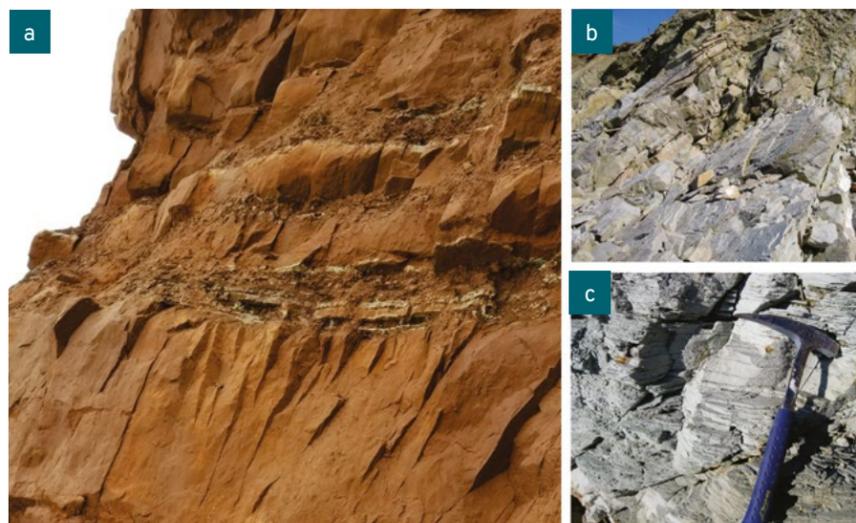
Contexte géologique (suite)



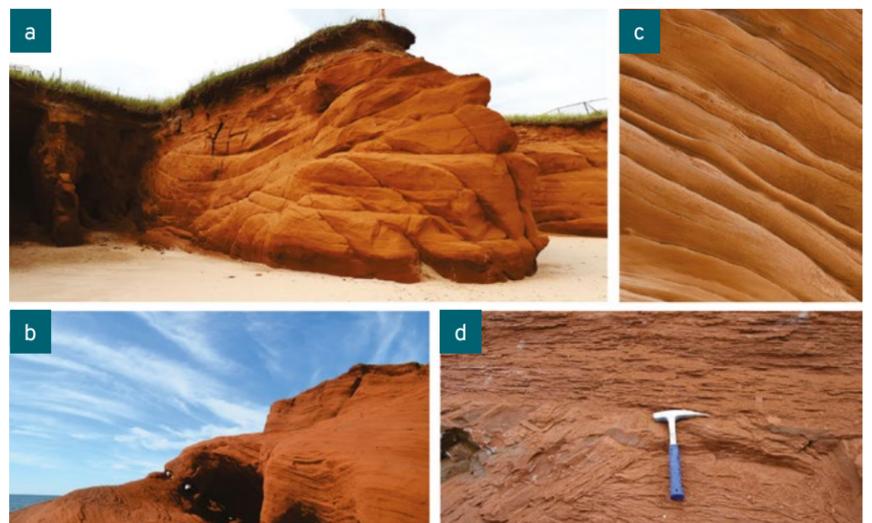
Photos de la Formation du Havre aux Maisons. a) Vue générale d'un affleurement comprenant la Formation du Havre aux Maisons et la Formation du Cap au Diable. b) Vue rapprochée d'un affleurement de la Formation du Havre aux Maisons. c) Vue agrandie de l'affleurement. d) Vue sur des veines de gypse dans l'affleurement.



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.



Photos du Membre de l'Étang-du-Nord. a) Strates de grès rouge de taille métrique interlitées de mudstone et siltstone. Les grès rouges de ce membre ont une allure semblable à ceux du Membre de l'Étang-des-Caps mais n'ont pas de stratifications obliques. b) et c) Lithologies de mudstone et siltstone.



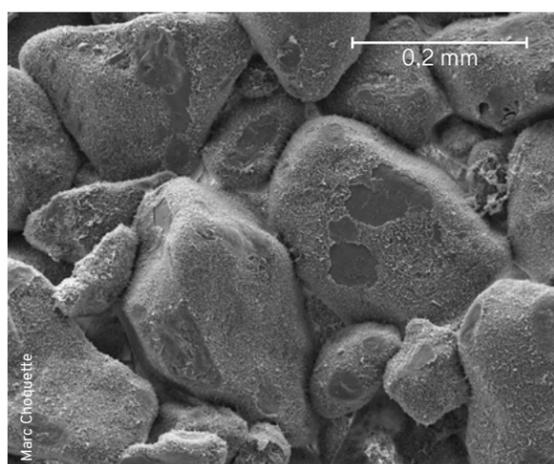
Photos du Membre de l'Étang-des-Caps. a) Stratifications obliques géantes. b) Structures d'érosion typiques observées sur la côte (crédit: Municipalité des Îles-de-la-Madeleine). c) Vue rapprochée des grès illustrant l'épaisseur des lits. d) Vue rapprochée d'affleurement illustrant les stratifications obliques.

FORMATION DU HAVRE AUX MAISONS

La Formation du Havre aux Maisons est une séquence formée d'évaporites à la base, suivie de roches terrigènes, puis de calcaires. L'épaisseur de cette formation n'est pas connue avec précision, mais pourrait atteindre plusieurs centaines de mètres. Elle couvre 9 % du territoire d'étude et 14 % des îles rocheuses.

FORMATION DU CAP AU DIABLE

La Formation du Cap au Diable 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. 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.



Photographie au microscope à balayage électronique d'un échantillon des grès du Membre de l'Étang-des-Caps grossi 500 fois, montrant la taille et la forme des grains de sable arrondis, et la faible quantité de ciment qui les lie.

FORMATION DU CAP AUX MEULES

La Formation du Cap aux Meules 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. Elle couvre 37 % du territoire d'étude et 54 % de la surface des îles rocheuses.

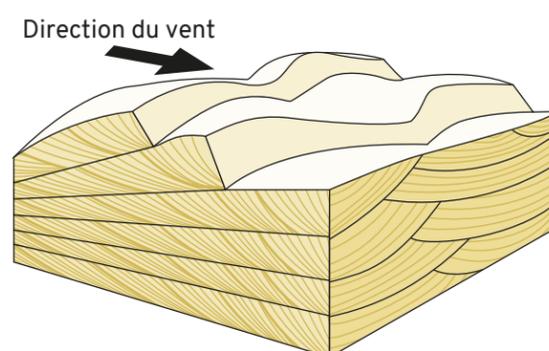
La formation a été divisée en deux unités, soit le Membre de l'Étang-du-Nord et le Membre de l'Étang-des-Caps. Ces deux membres sont constitués d'un assemblage de roches légèrement différentes qui sont caractéristiques de leur environnement de déposition.

Membre de l'Étang-du-Nord

Ces roches se sont déposées dans des environnements de déposition fluviale, éoliens 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. Il occupe 7 % du territoire d'étude.

Membre de l'Étang-des-Caps

Les roches du Membre de l'Étang-des-Caps correspondent aux 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



Les stratifications obliques géantes sont formées par l'empilement de dunes de sable formées dans un environnement désertique.

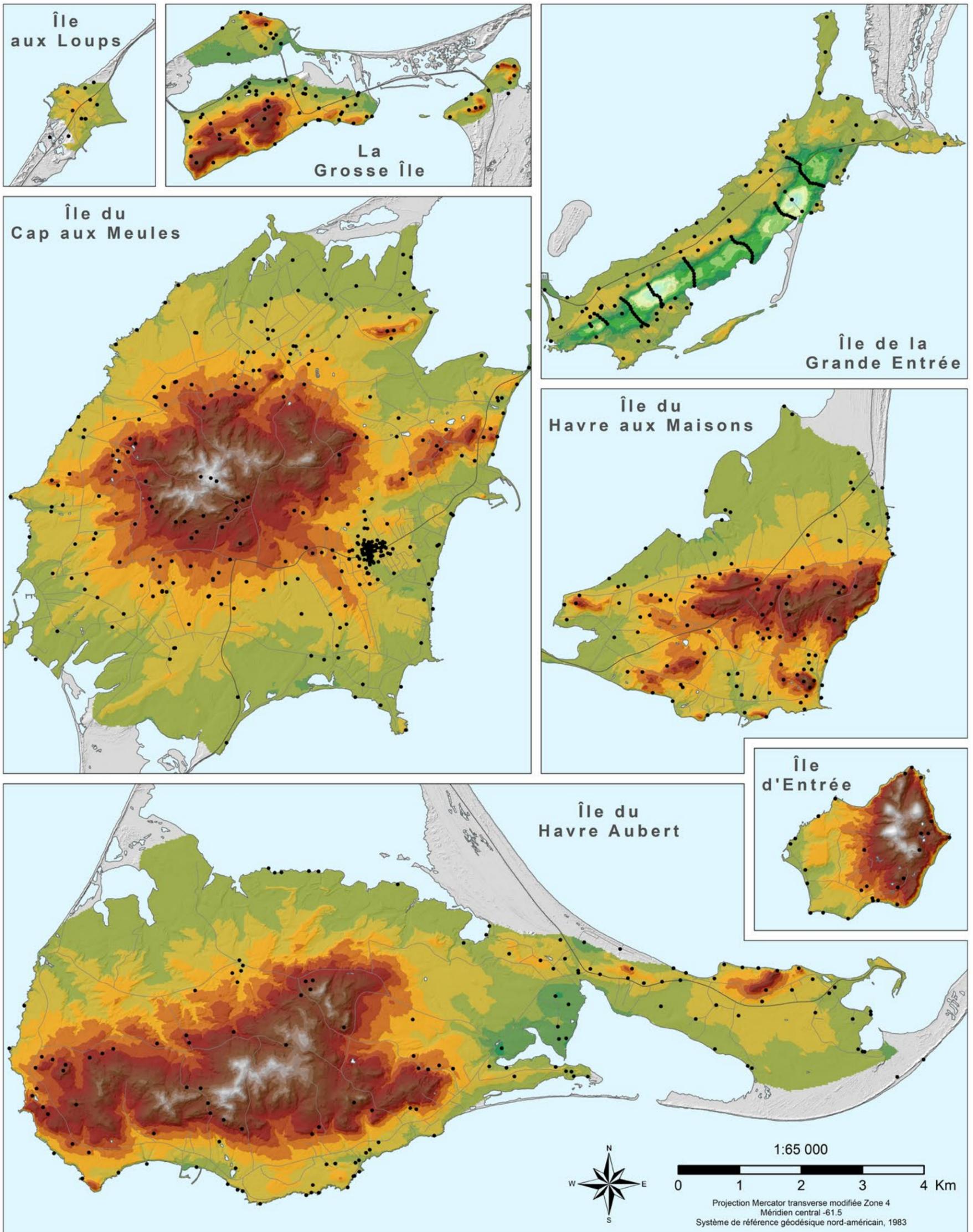
l'Étang-des-Caps est l'uniformité de la géométrie des matériaux. Ceux-ci correspondent à un empilement de dunes de sable fossilisées. Des stratifications (couches de roche) obliques géantes, dont les tailles varient de 0,5 mm à 10 cm de largeur sur 10 cm à 20 m de longueur, sont réparties sur toute l'épaisseur 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. Ces grès sont très poreux et friables.

Topographie du roc

La topographie du roc permet d'identifier les dépressions (creux) importantes du roc où peut s'accumuler une grande quantité de dépôts meubles qui peuvent avoir un potentiel aquifère intéressant si ces sédiments sont grossiers (sables et graviers).

L'élévation du socle rocheux s'obtient de la soustraction de l'élévation de la surface du sol par l'épaisseur des dépôts meubles, présentée à la section éponyme ultérieure. La topographie du roc est représentée cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m.

Le socle rocheux présente une topographie très similaire au modèle altimétrique numérique de surface, montré à la section *Élévation du sol et bathymétrie*. Les élévations les plus importantes se situent sur les buttes centrales, et elles diminuent graduellement 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 (voir à la section *Épaisseur des dépôts meubles*), 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.



ÉLÉVATION DU SOCLE ROCHEUX

- Observation d'élévation du roc
- Route nationale
- Route locale
- Plan d'eau

Élévation du socle rocheux (mètre par rapport au niveau moyen des mers)



Sources :

- Estimation de l'élévation du socle rocheux : Portrait des ressources en eau souterraine des Îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Géologie des formations superficielles

Les formations superficielles sont des dépôts meubles non consolidés qui recouvrent le socle rocheux. Ces sédiments ont principalement été déposés pendant et depuis la dernière glaciation de la période géologique 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.

Au dernier maximum glaciaire, il y a 21 milliers d'années, le poids de la calotte glaciaire était suffisamment important pour causer un affaissement de la croûte terrestre. 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. Ces mouvements verticaux de la croûte terrestre conjugués à la variation du niveau des mers associée à la fonte des glaciers ont causé des fluctuations complexes du niveau marin relatif.

Les glaciers ont ensuite commencé à se retirer, et il y a entre 20 et 15 milliers d'années, 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 émergeait de l'eau. 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 il y a 10 milliers d'années, le niveau des mers le plus bas, environ 20 m sous le niveau actuel, a été atteint. 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.

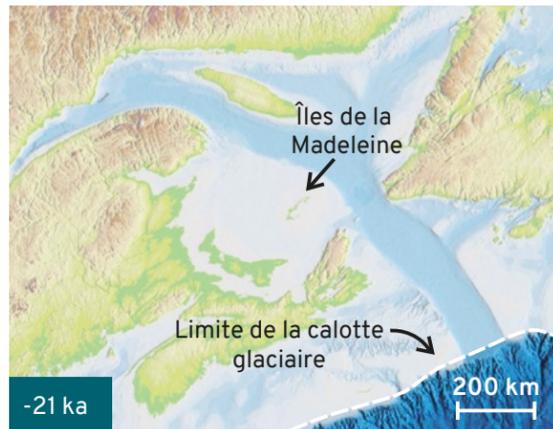
Épaisseur des dépôts meubles

L'épaisseur et la nature des dépôts meubles influencent l'écoulement de l'eau souterraine. Si les dépôts sont grossiers (ex.: sable, gravier) et suffisamment épais, ils pourraient représenter un bon réservoir d'eau souterraine. Au contraire, si les dépôts sont fins (ex.: silt, argile) ou minces, l'eau souterraine ne pourra pas y être exploitée.

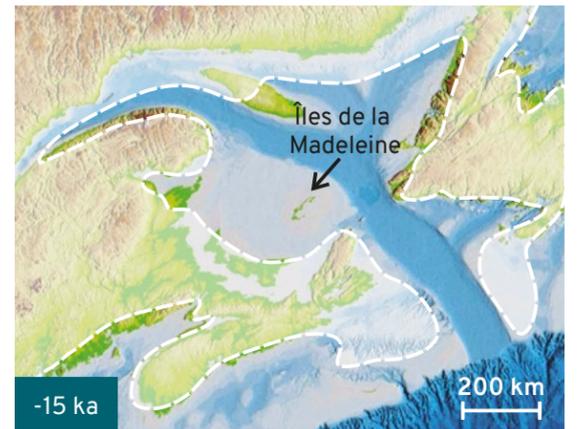
L'épaisseur des dépôts meubles reposant sur le socle rocheux est représentée cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m. Elle a été estimée par interpolation des observations de profondeur au roc observées lors des forages. Les affleurements rocheux ont aussi servi pour identifier les endroits où l'épaisseur des dépôts meubles est nulle. Les localisations des observations ayant servi à l'interpolation sont présentées afin de juger de la fiabilité de l'estimation d'un secteur qui dépend directement de la densité des observations dans ce secteur.

À l'exception 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.

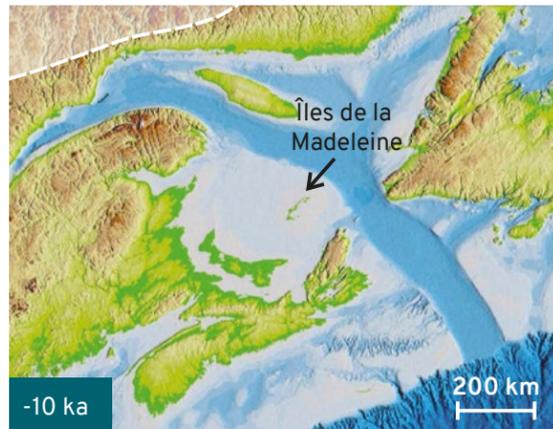
Quelques endroits montrent une épaisseur de dépôts meubles un peu plus élevée, de l'ordre de 10 à 15 m, soit dans le secteur du port de Grosse-île, quelques zones très localisées dans les secteurs de Cap-aux-Meules, l'Étang-du-Nord et Fatima, et le secteur à l'ouest du Bassin sur l'île du Havre Aubert.



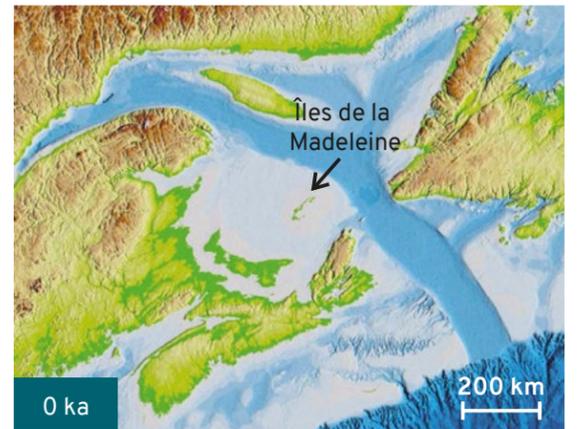
-21 ka
Étendue maximale des glaciers au dernier maximum glaciaire. L'archipel est complètement recouvert par la glace.



-15 ka
Marge glaciaire vers -15 ka. L'archipel est libre de glace.

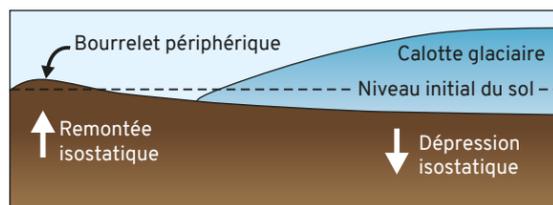


-10 ka
Marge glaciaire vers -10 ka.

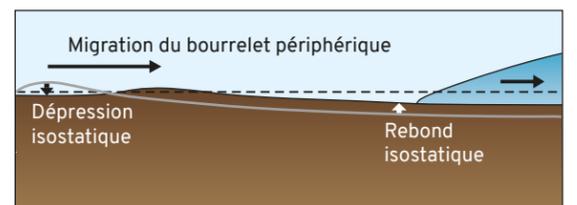


0 ka
Au temps présent, la marge de la calotte glaciaire a complètement disparu de la région.

Chronologie glaciaire du Golfe du Saint-Laurent lors de la dernière période glaciaire. Modifié de Mercier-Rémillard et coll. (2016) et Shaw et coll. (2002).

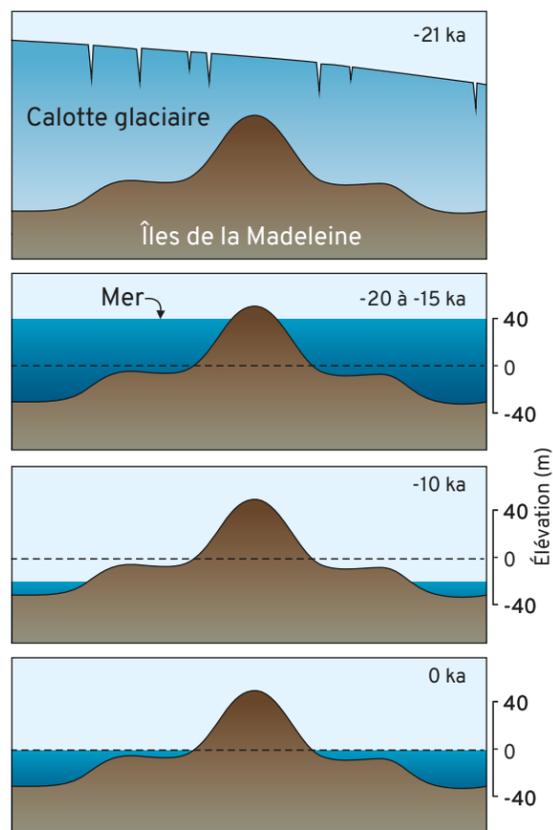


Enfoncement de la croûte terrestre (dépression isostatique) et formation du bourrelet périphérique (remontée isostatique) en marge du glacier.

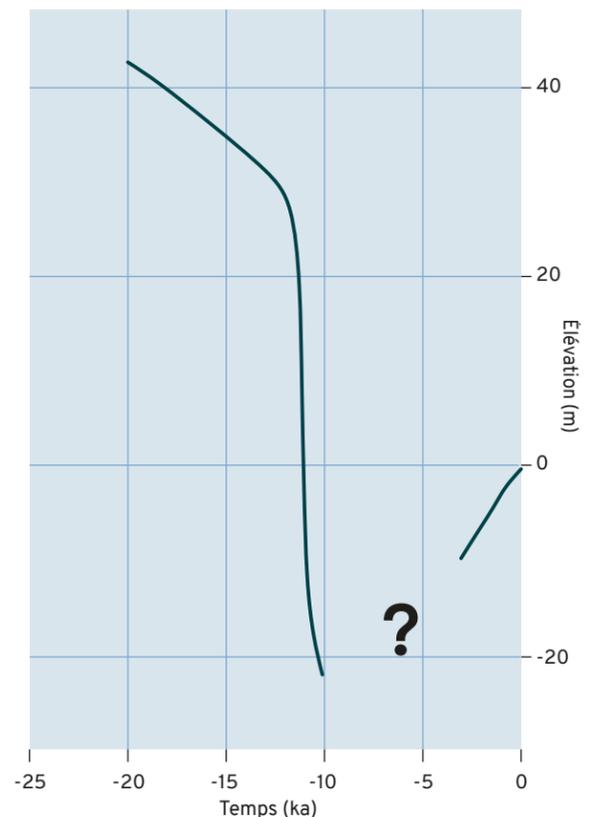


Dépression isostatique en raison de l'affaissement et de la migration du bourrelet périphérique et remontée isostatique en raison de la fonte du glacier.

Schématisation du phénomène d'isostasie. Adapté de Oakley et Boothroyd (2012) et Mercier-Rémillard (2016).



Coupes schématiques illustrant l'histoire géologique récente de l'archipel et les variations relatives du niveau marin par rapport au niveau actuel.

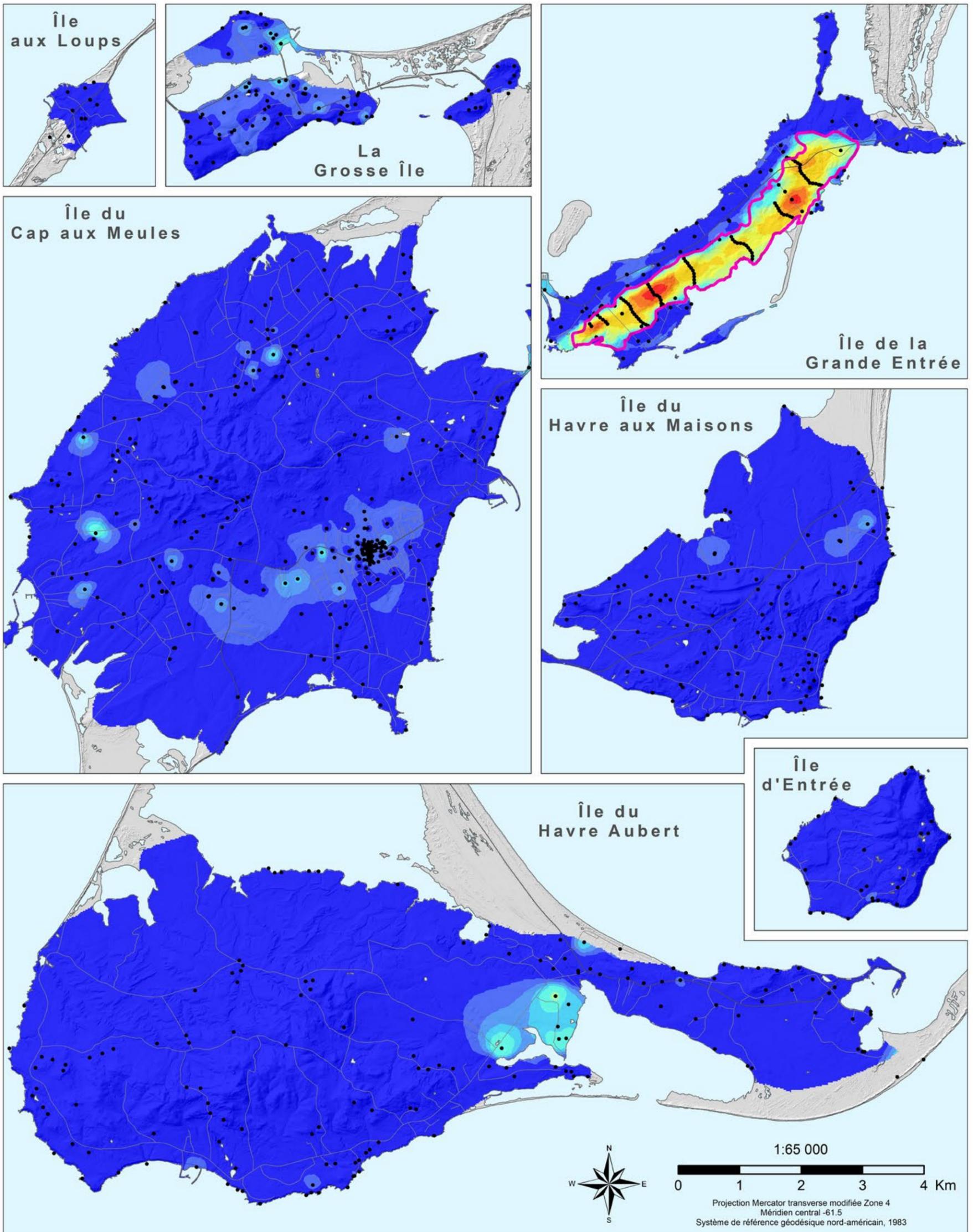


Courbe d'émergence des îles de la Madeleine qui décrit l'élévation du niveau marin par rapport au niveau actuel depuis le dernier maximum glaciaire jusqu'à maintenant. Modifié de Mercier-Rémillard et coll. (2017).

Des relevés géophysiques (profils de résistivité électrique) ont permis de densifier les observations sur l'île de la Grande Entrée et ainsi mieux caractériser la vallée glaciaire de dépôts meubles chenalisés qui occupe le centre de l'île. Cette vallée enfouie, remplie de sables fins contenant parfois des grains plus grossiers comme des graviers et des cailloux, s'étend du nord-est au sud-ouest sur environ 5 km, et ferait de 500 à 700 m de large.

Elle fait en moyenne 35 m de profondeur, et atteint près de 100 m en son centre. À défaut d'observations suffisantes, la localisation (et la profondeur) de la vallée demeurent inconnues à son extrémité nord-est, mais pourrait s'étendre vers la mer.

Ailleurs sur l'île de la Grande Entrée, on retrouve une mince couche de dépôts meubles, semblable aux autres îles.



ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES



Sources :

- Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles : Portrait des ressources en eau souterraine des Îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Limites de la vallée glaciaire à l'île de la Grande Entrée : Portrait des ressources en eau souterraine des Îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Description des dépôts meubles

Les dépôts meubles observés en surface et les éléments morphologiques ont été établis par Dubois et Parent (en révision). Les données cartographiques ont été obtenues du Système d'information géominère du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

Les **dépôts de versant** et la **roche en place** 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. La roche en place 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).

Le **till**, continu ou non, occupe 23 % du territoire. Il domine presque partout sur l'île du Havre Aubert. On l'observe aussi sur le plateau de grès au sud de l'île du Cap aux Meules.

Les **sédiments alluviaux** représentent moins de 1 % du territoire. On en retrouve sous forme de cône alluvial au sud de l'île du Cap aux Meules.

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

Globalement, les dépôts meubles en surface des îles de la Madeleine sont tous perméables, à l'exception des sédiments organiques, qui pourraient limiter la circulation de l'eau. De plus, les empilements de sédiments, généralement minces, sont rares aux îles de la Madeleine. Des dépôts anciens ont 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).

Remblais: sédiments mis en place par l'Homme.

Sédiments organiques: dépôts meubles formés par l'accumulation de matière organique non décomposée dans un milieu humide.

Sédiments éoliens: sédiments mis en place par le vent sous forme de dunes.

Dépôts de versant: sédiments mis en place par la gravité (ex.: éboulis, glissements de terrain).

Sédiments alluviaux: sédiments mis en place le long des cours d'eau.

Sédiments lacustres: sédiments mis en place dans un lac.

Sédiments marins: sédiments mis en place par la mer.

Sédiments littoraux et pré-littoraux: sédiments mis en place en eau peu profonde.

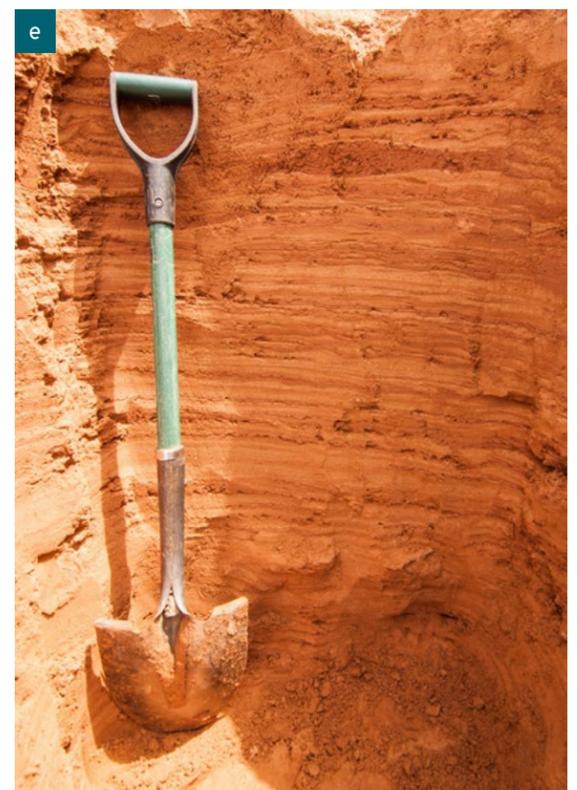
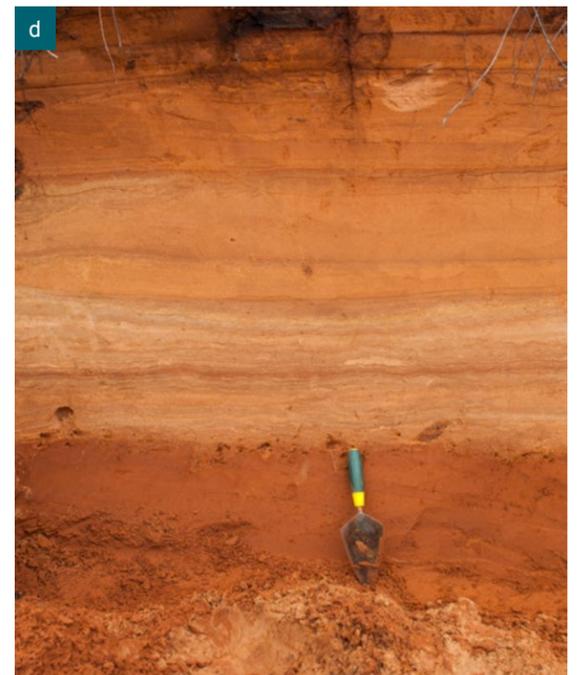
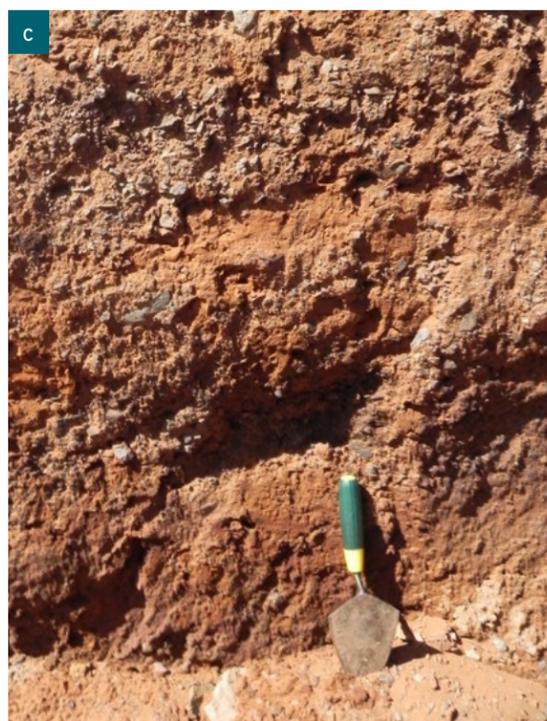
Sédiments glaciomarins: sédiments mis en place lors de l'épisode d'immersion des terres par la mer suite au retrait du glacier.

Till: type de dépôt mis en place sous un glacier, composé de sédiments de toutes tailles dans une matrice de sédiments plus fins.

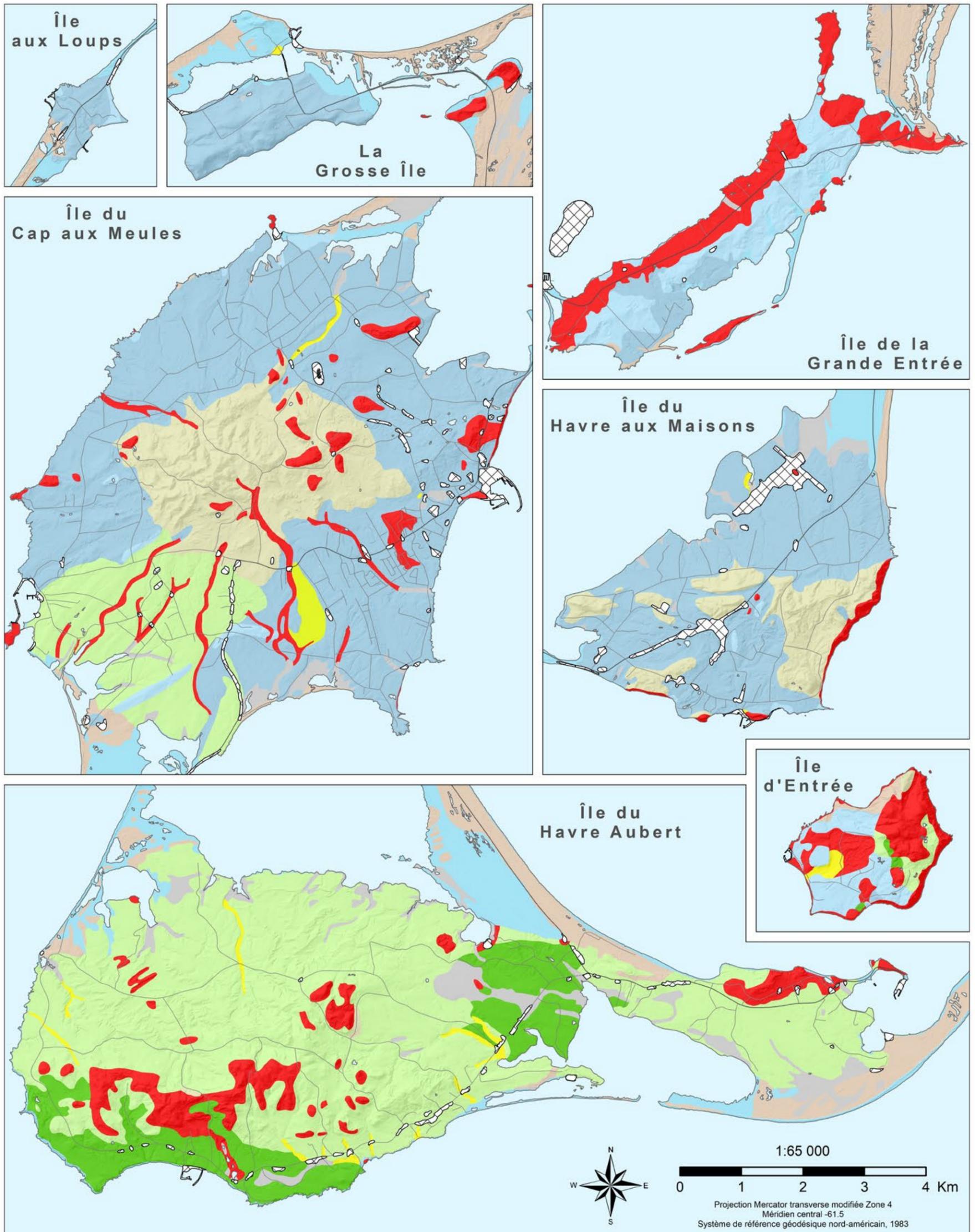
Till continu: épaisseur supérieure à 1 m.

Till en couverture mince et discontinue: épaisseur de moins de 1 m, et dont la surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux.

Roche en place: affleurement rocheux avec une mince couverture de sédiments meubles (moins de 30 cm).



Photos 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 pré-littoraux, île du Havre aux Maisons. f) Till mince, île du Cap aux Meules. Crédits photographiques : Audrey M. Rémillard.



GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

 Route nationale
  Route locale
  Plan d'eau
  Zone de remblai

Formations superficielles

 O	Sédiment organique non différencié	 A	Alluvion non différenciée	 MG	Sédiment glaciomarin non différencié
 Ed	Sédiment éolien	 L	Sédiment lacustre non différencié	 Tc	Till en couverture généralement continue
 C	Dépôt de versant non différencié	 Mb	Sédiment marin littoral et pré-littoral	 Tm	Till en couverture mince et discontinue
 Ac	Cône alluvial	 MGB	Sédiment glaciomarin littoral et pré-littoral	 R	Roche en place non différenciée

Sources :

- Formations superficielles : Dubois, J.-M. et Parent, M. (en révision). Système d'information géomorphe du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique est la représentation conceptuelle des éléments du territoire et processus influençant l'écoulement des eaux souterraines. Il est propre à chaque territoire et dépend de nombreux facteurs, notamment la géologie du roc et des dépôts meubles, leurs propriétés hydrauliques, comme leur aptitude à contenir de l'eau et à la laisser s'écouler, ainsi que des conditions physiographiques locales.

TERMES À CONNAÎTRE

Aquifère: Unité géologique saturée en eau, suffisamment perméable pour permettre un écoulement important de l'eau souterraine et son exploitation.

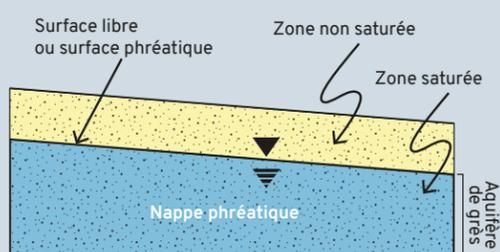
Nappe: Eau souterraine contenue dans un aquifère

Surface phréatique (syn. surface libre): Par définition, la surface phréatique correspond à la profondeur dans le sol où la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique. En pratique, cette profondeur correspond à la transition entre la zone saturée et non saturée.

Aquifère à nappe libre (syn. aquifère non confiné): Aquifère dont la surface phréatique constitue la limite supérieure.

Nappe phréatique (syn. nappe libre): Nappe d'eau souterraine contenue dans un aquifère à nappe libre.

Charge hydraulique: exprime une énergie disponible par unité de masse d'eau. De manière simplifiée, ce terme exprime l'élévation de la surface libre par rapport au niveau moyen de la mer.



Contexte hydrogéologique régional

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 phréatique d'eau douce 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**.

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. 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.

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 transition entre l'eau douce et l'eau salée. La réalisation d'un profil de conductivité électrique de l'eau dans un puits permet d'observer cette zone de transition. En effet, la **conductivité électrique** est différente dans l'eau douce et l'eau salée. La valeur pour l'eau douce varie entre 0 et 1 000 $\mu\text{S}/\text{m}$ alors que la valeur de l'eau salée se situe près de 35 000 $\mu\text{S}/\text{m}$.

Dans le cadre du déploiement du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques a mis en place, en 2016, six puits d'observation, dont cinq sont situés sur l'île de la Grande Entrée et un sur l'île du Cap aux Meules. Ils ont été forés à de grandes profondeurs pour intersecter l'interface eau douce – eau salée afin d'en observer les changements sur le long terme. Les profils de conductivité électrique réalisés dans ces

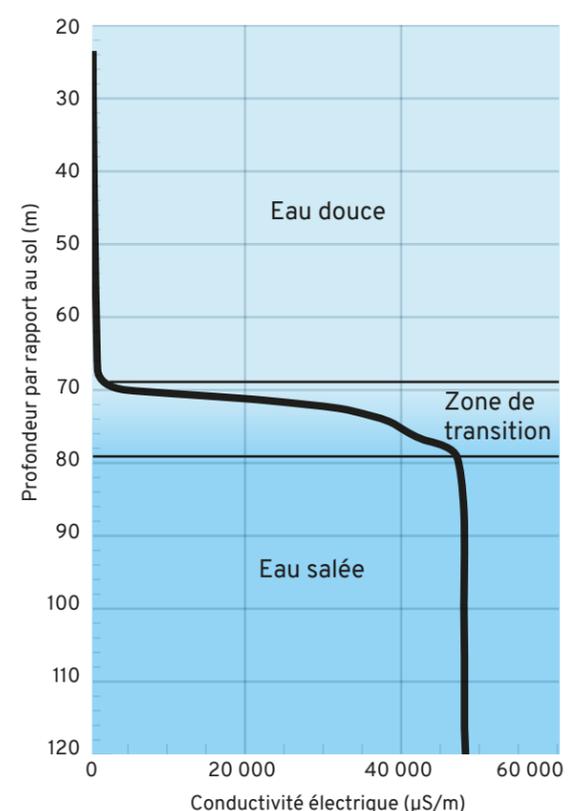
puits montrent que la zone de mélange est assez étroite et varie environ de 4 à 7 m pour les puits de l'île de la Grande Entrée, et est de 16 m pour le puits situé sur l'île du Cap aux Meules.

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 eau douce – eau salée va se produire. 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 à se produire – cela dépend des propriétés des aquifères. 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.

L'élévation de l'interface eau douce – eau salée étant directement corrélée au niveau de la nappe, tout phénomène ayant une influence sur le niveau de la nappe influencera 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.

Étant donné qu'ils peuvent être affectés par les changements climatiques, ils pourraient avoir un impact sur la position de l'interface.

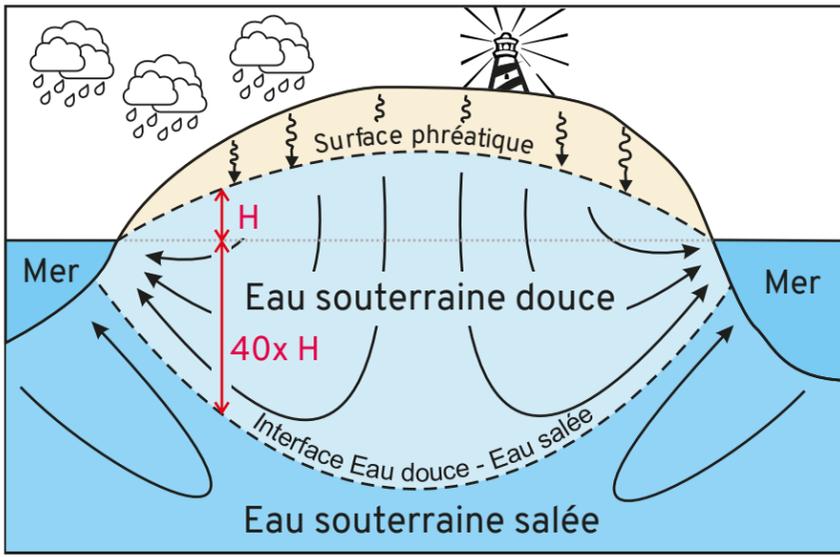
Conceptuellement, une diminution de la recharge abaissera le niveau de la nappe et entraînera une remontée de l'interface eau douce – eau salée, amoindissant de ce fait l'épaisseur de la lentille d'eau douce ainsi que le volume d'eau douce disponible. L'inverse est aussi valable: une augmentation de 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.



Exemple d'un profil de conductivité électrique de l'eau, permettant d'illustrer les changements de la salinité de l'eau en fonction de la profondeur. La zone de mélange (de transition) est relativement étroite.



Sonde utilisée pour la mesure de la conductivité électrique de l'eau souterraine dans un puits sur l'île de la Grande-Entrée.



Contexte hydrogéologique simplifié des îles de la Madeleine. La nappe d'eau douce y apparaît sous la forme d'une lentille. L'eau qui s'infiltré et qui recharge la nappe phréatique s'écoule en profondeur pour faire 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.

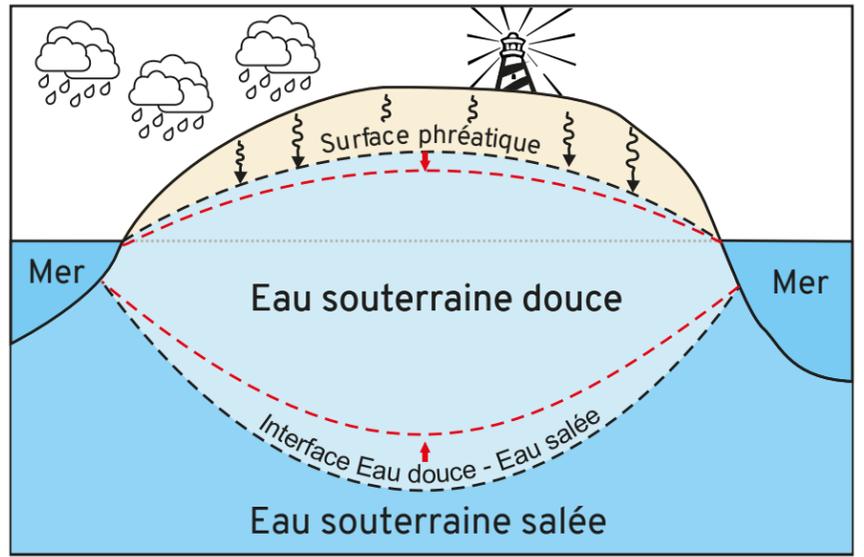


Schéma illustrant l'effet de la diminution de la recharge, causant une baisse de la nappe phréatique et une remontée de l'interface eau douce - eau salée, amoindissant ainsi l'épaisseur de la lentille d'eau douce et le volume d'eau douce disponible.

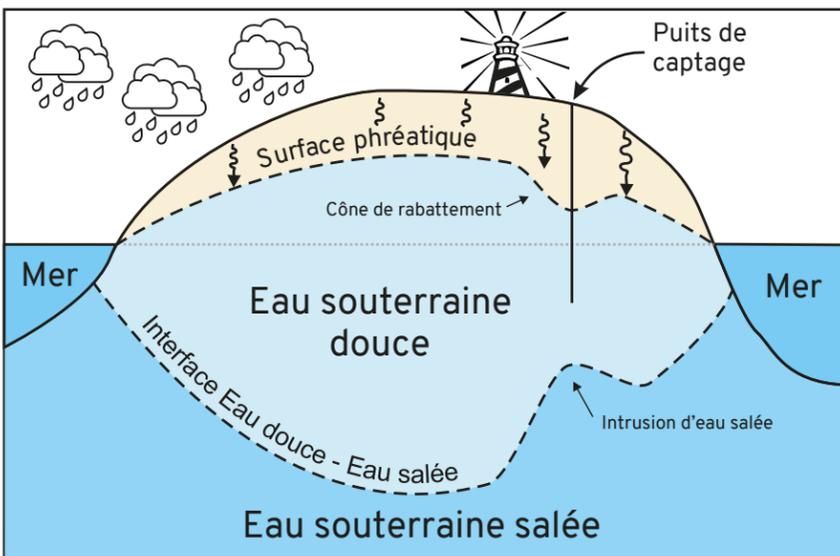


Schéma illustrant l'intrusion d'eau salée associée au rabattement de la nappe phréatique dû au pompage dans un puits de captage. À noter que le schéma n'est pas à l'échelle et que d'après la relation de Ghyben-Herzberg, la remontée de l'eau salée est de 40 fois le rabattement.

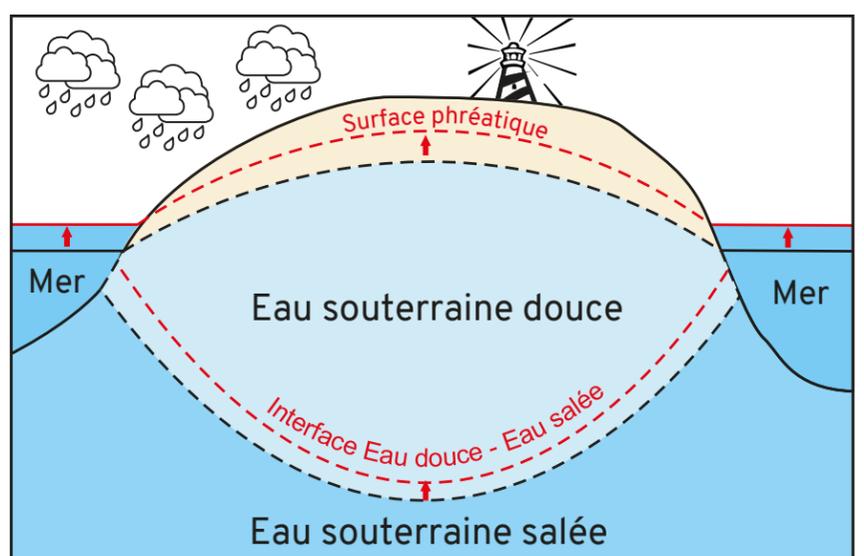
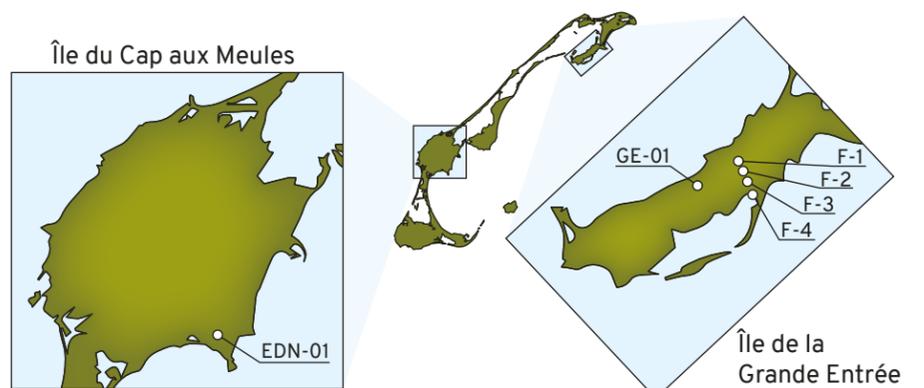
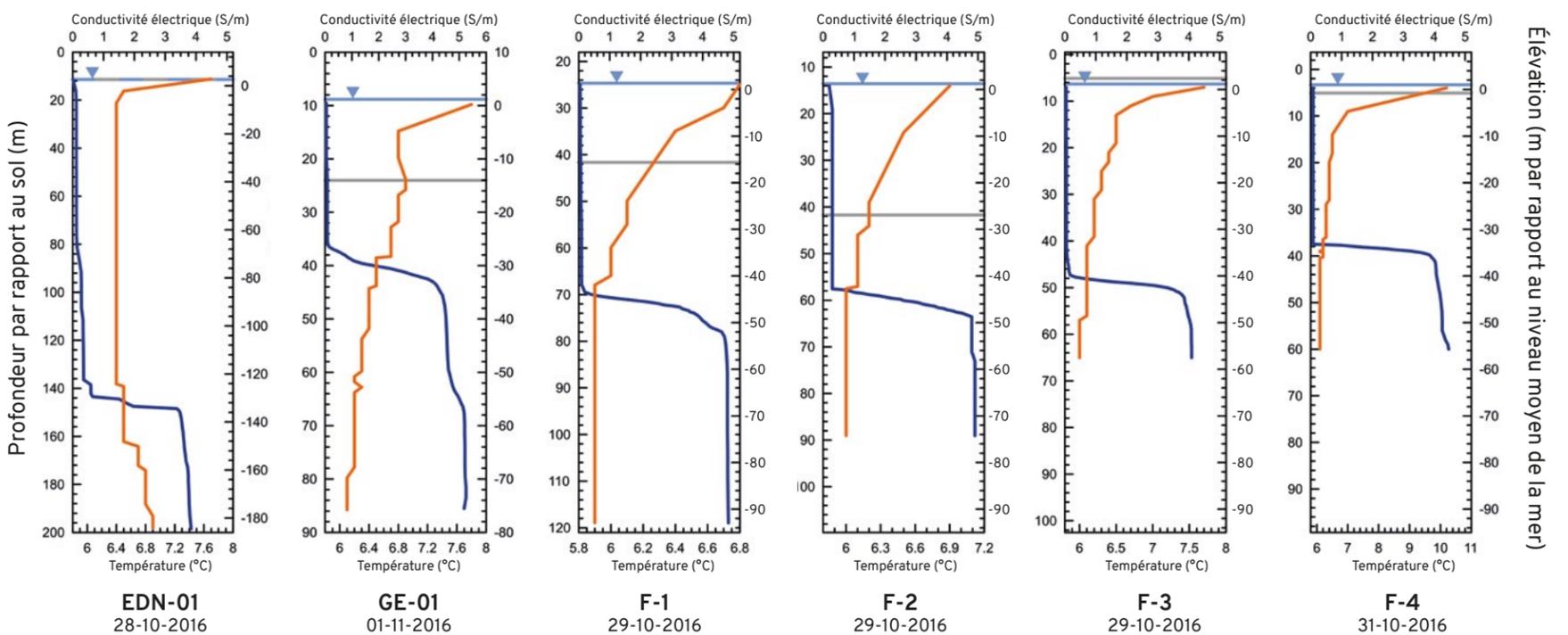


Schéma illustrant l'effet de l'augmentation du niveau de la mer causant une remontée de l'interface eau douce - eau salée et une hausse du niveau de la nappe. L'immersion des terres en bordure des îles réduit la superficie terrestre et le volume d'eau douce disponible.



Profils de conductivité électrique et de température de l'eau dans les puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec, du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Cinq puits sont situés sur l'île de la Grande Entrée et un sur l'île du Cap aux Meules. Ils ont été forés à de grandes profondeurs pour intersecter l'interface eau douce - eau salée afin d'en observer les changements sur le long terme.

Pressions sur l'eau souterraine

Les partenaires du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, tous acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau, ont jugé prioritaires les trois préoccupations suivantes au regard de la protection et de gestion des eaux souterraines :

- La surexploitation et la quantité d'eau disponible;
- La pérennité des puits, tant au niveau de la quantité que de la qualité de l'eau;
- L'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau souterraine.

Les pressions exercées sur la ressource en eau souterraine ont été identifiées par le *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*. Celles-ci se regroupent dans trois grandes catégories.

Le risque d'**intrusion d'eau salée dans des puits de captage** recoupe les deux premières préoccupations jugées prioritaires. L'exploitation de l'eau souterraine par des puits, si réalisée de façon imprudente, pourrait mener à une intrusion d'eau salée dans la lentille d'eau douce par sa base.

Les **changements climatiques**, pouvant avoir pour conséquence de réduire la disponibilité de la ressource, ont le potentiel d'exacerber les mêmes deux préoccupations jugées prioritaires.

Les **activités humaines menaçantes** pratiquées sur le territoire concernent la troisième préoccupation prioritaire. Étant donné l'absence de couche imperméable au-dessus des aquifères, les contaminants libérés par les activités humaines pourraient atteindre facilement et rapidement la nappe phréatique.

Intrusion d'eau salée dans des puits de captage

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. 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, plusieurs décennies peuvent être nécessaires avant que l'intrusion ne se résorbe et que le puits puisse être utilisé de nouveau. De nouveaux puits de captages, éloignés des puits salinisés, pourraient donc devoir être aménagés pour pallier à cette situation.

Il faut s'assurer que l'exploitation des puits de captage soit réalisée de manière durable. C'est pourquoi 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. Celles-ci sont présentées à la section *Outils quantitatifs pour la gestion de la ressource*.

Changements climatiques

Outre la demande accrue 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. Les résultats des simulations sont présentés à la section *Outils quantitatifs pour la gestion de la ressource*. Également, la remontée du niveau marin relatif a été intégrée aux simulations, selon la hausse médiane de 0,19 m attendue en 2050. 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.

Activités humaines menaçantes

TRANSPORT ET ENTREPOSAGE DES HYDROCARBURES

La présence d'hydrocarbures sur le territoire est inévitable, car ils sont nécessaires à la réalisation de plusieurs activités. De nombreuses fuites et déversement, parfois mineures, mais quelques-uns majeurs ont été recensés dans le sol ou dans la mer.

Ceux-ci comprennent :

- Plus d'une trentaine de signalements reliés à des fuites des réservoirs domestiques de mazout ou des déversements lors de leur remplissage. Il est estimé qu'environ 50 % des résidences aux îles de la Madeleine possèdent un système de chauffage aux hydrocarbures.
- Un déversement de 40 000 L de diesel au site de la centrale thermique d'Hydro-Québec, et une fuite de 100 000 L du pipeline reliant le port de Cap-aux-Meules à la centrale.
- Une marée noire lors d'un naufrage d'une barge de transport transportant 4 300 tonnes de mazout. Le Golfe du Saint-Laurent constitue la porte d'entrée pour l'importante voie maritime du Saint-Laurent.
- Une migration vers la surface de diesel utilisé lors d'anciens forages d'exploitation gazière et salifère.
- Une fuite de diesel au site des Mines Seleine.
- Au moins une dizaine d'autres sites problématiques dans le Répertoire des terrains contaminés du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.



Livraison maritime de marchandises, port de Cap-aux-Meules.



Entreposage de carburants lourds, centrale thermique, Cap aux Meules.



Réservoirs domestiques d'hydrocarbures.

GESTION DES EAUX USÉES

La principale source de contamination microbiologique des eaux souterraines provient des eaux usées, issues d'installations septiques autonomes déficientes ou mal entretenues (BAPE, 2013). Près de 30 % des 4 500 installations sous juridiction municipale ont été jugées non conformes (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016). Le risque de contamination par des microorganismes, mais aussi d'autres contaminants comme les nitrites-nitrates et les produits pharmaceutiques est donc important.

D'autre part, il existe actuellement cinq systèmes d'assainissement collectifs municipaux aux îles de la Madeleine, soit sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons et du Havre Aubert. Ceux-ci desservent tout près de 1 500 bâtiments (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.

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.

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.

Depuis 2010, les matières résiduelles et recyclables de l'archipel sont acheminées sur le continent au lieu d'enfouissement technique de Saint-Rosaire et au centre de tri de Victoriaville (BAPE, 2006). Les matières compostables sont toujours traitées sur place.

UTILISATION DE SELS DE DÉGLAÇAGE

Une contamination de l'eau souterraine, par la présence de l'anion de chlorure, peut subvenir si les sels de voirie sont utilisés en trop grande quantité.

Environ 2 000 t/an de sels de voirie sont utilisées par le ministère des Transports pour l'entretien d'un réseau routier de 107 km (route 199 et routes collectrices). Pour le réseau routier municipal de 235 km, l'utilisation varie entre 450 et 550 t/an, selon les années (Tremblay et coll., 2022).

EXPLORATION ET EXPLOITATION DES RESSOURCES NATURELLES

Gisement de sel

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.

Carrières et sablières

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 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. On y utilise fréquemment de la machinerie lourde et on y entasse 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. Comme la couche de sol est exploitée et retirée, ces endroits deviennent plus vulnérables pour la contamination de la nappe.

Exploration et exploitation des hydrocarbures

Un rapport d'enquête et d'audience publique du BAPE (2013) a porté 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. Un des objectifs était « d'informer la population sur les enjeux de ces activités en milieu insulaire, de la consulter et d'éclairer



Élevage de bovins, île du Havre aux Maisons.



Cimetière du Bassin, île du Havre Aubert.

le gouvernement dans sa réflexion quant aux mesures à prendre pour assurer la protection des nappes phréatiques des îles de la Madeleine» (BAPE, 2013). 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 ont été évaluées. 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.

Il a été conclu que, puisque l'eau souterraine représente l'unique source d'alimentation en eau potable, et que les aquifères sont de vulnérabilité élevée, 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.

AGRICULTURE

L'occupation du sol liée à l'agriculture couvre 14,0 km², soit 7 % du territoire d'étude. 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 affecter la santé humaine. Toutefois, comme l'agriculture n'est pas intensive sur les îles, l'impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau souterraine semble limité.

CIMETIÈRES

On retrouve six cimetières, situés sur les îles du Cap aux Meules, du Havre aux Maisons, du Havre Aubert et la Grosse Île. La décomposition d'un corps peut entraîner une contamination en nitrites et nitrates et la présence de bactéries et virus.

ACTIVITÉS AÉROPORTUAIRES

L'aéroport des Îles-de-la-Madeleine, situé sur l'île du Havre aux Maisons, est en fonction depuis 1956. L'aéroport est opérationnel en hiver, ce qui nécessite le déglacage des pistes et le dégivrage des avions. Jusqu'à 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.

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. Par exemple, 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). Les garages d'entretien d'automobiles, les ferrailleurs sont aussi à risque de déversements accidentels d'huiles, des solvants et des métaux lourds.

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'infiltreront ensuite vers la nappe en bordure des surfaces imperméables.

Modèles hydrogéologiques

numériques

Afin de produire certaines des cartes hydrogéologiques, ainsi que pour le développement d'outils quantitatifs pour la gestion durable de la ressource, des modèles hydrogéologiques numériques, simulant l'écoulement de l'eau souterraine douce et salée, ont été développés et calibrés pour chaque île principale afin:

- d'estimer la position de la nappe phréatique et de l'interface eau douce – eau salée;
- d'interpréter les directions d'écoulement de l'eau souterraine;
- d'estimer l'épaisseur de la lentille d'eau douce et le volume d'eau disponible;
- de déterminer les différentes composantes du bilan hydrologique;
- d'évaluer la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits de pompage municipaux;
- de quantifier les ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place;
- de délimiter les aires d'alimentation des aquifères exploitables.

QU'EST-CE QU'UN MODÈLE NUMÉRIQUE ?

Un modèle numérique est une représentation simplifiée d'une réalité complexe. Dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, les modèles développés décrivent l'écoulement des eaux souterraines à l'aide d'équations mathématiques résolues par ordinateur. L'idée générale derrière ces équations est bien simple: un bilan comptable de la quantité d'eau qui entre dans les aquifères (ex. précipitations) par rapport à celle qui en sort (ex. pompage) et à celle qui est emmagasinée est établi. L'évolution de ce bilan nous renseigne sur la position du niveau de l'eau douce et de l'eau salée dans le sol.

Les modèles développés décrivent l'écoulement des eaux souterraines à l'aide d'**équations mathématiques** résolues par ordinateur

JUSTIFICATION DE L'UTILISATION DES MODÈLES

Tel qu'exposé dans la section *Contexte hydrogéologique*, un puits en pompage 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, amplifiant ainsi le phénomène de la remontée de l'interface et le risque de contamination du puits par de l'eau salée. Un puits contaminé peut prendre des décennies pour revenir à un état d'équilibre non contaminé. Ainsi, le suivi de la position de l'interface eau douce – eau salée sous les puits de pompage des réseaux de distribution en eau potable de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine est de grand intérêt. Bien que quelques mesures ponctuelles permettent d'estimer la profondeur de l'interface et la piézométrie, celles-ci ne permettent pas de cartographier sur l'ensemble de l'archipel car celles-ci ne sont pas assez abondantes sur le territoire couvert par l'étude pour utiliser cette méthode. Afin de combler ce manque d'information, des modèles numériques d'écoulement des eaux souterraines ont été développés.

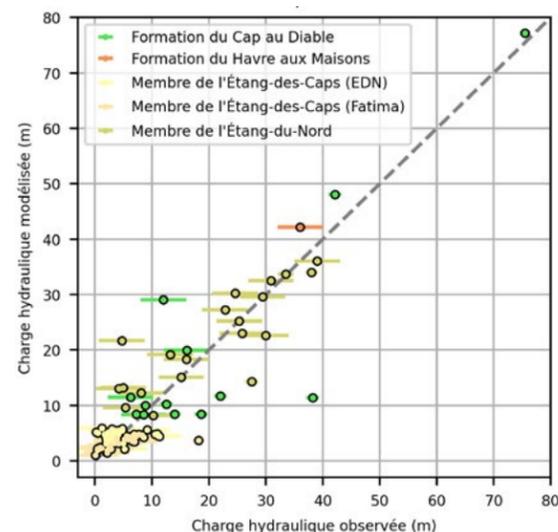
CALIBRATION DES MODÈLES

Une fois les modèles développés, un effort particulier doit être réalisé pour s'assurer que ceux-ci représentent bien la réalité observée sur le terrain. Ce processus est nommé la calibration des modèles.

La calibration d'un modèle consiste à faire varier des paramètres d'entrée sur un intervalle plausible pour que les résultats de modélisation s'approchent le

plus possible d'observations mesurées sur le terrain (ex.: charges hydrauliques et profondeurs de l'interface).

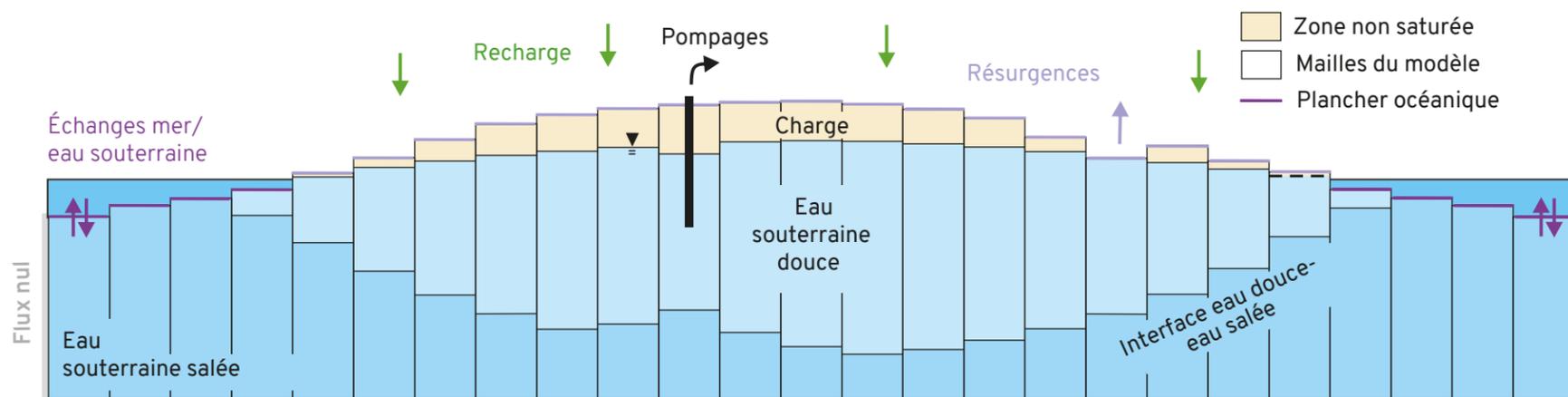
Un exemple de résultat d'une calibration est présenté dans le graphique ci-dessous, qui compare les charges hydrauliques simulées par le modèle avec celles mesurées sur le terrain. Lorsque le modèle représente parfaitement les observations de terrain, ces données s'alignent sur la droite pointillée.



Exemple de résultats de calibration pour l'île du Cap aux Meules.

UTILISATION DES MODÈLES

Les résultats provenant des modèles calibrés ont été utilisés pour préparer de nombreuses cartes thématiques, notamment la carte piézométrique, l'épaisseur de la lentille d'eau douce, la profondeur de l'interface eau douce – eau salée, la recharge et les résurgences. Les modèles ont aussi été utilisés comme outils quantitatifs pour la gestion durable des ressources en eau souterraine sur l'archipel. Ces résultats sont présentés dans les sections suivantes.



Représentation simplifiée en coupe d'un modèle numérique 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 hydraulique au-dessus du niveau de la mer.



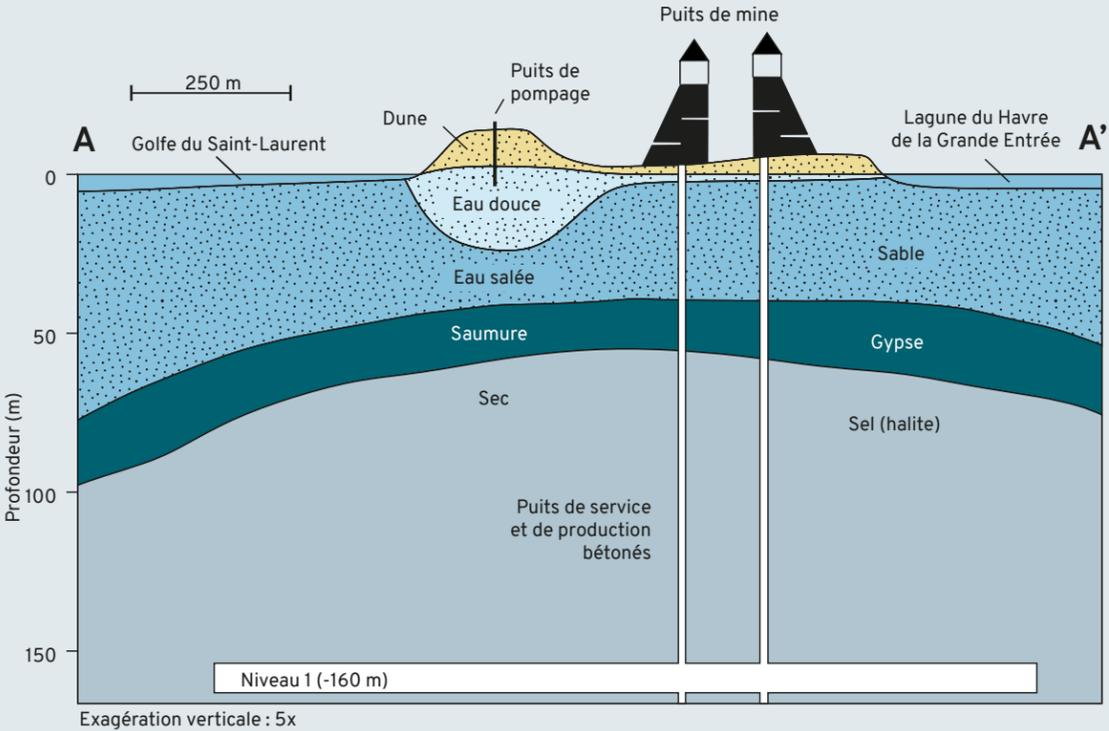
Localisation de Mines Seleine près de la Grosse Île indiquant les limites de la mine souterraine et la position des puits de pompage. Modifié de Mines Seleine (2013).

Mines Seleine exploite un gisement de sel, situé sur le cordon dunaire au sud de la Grosse Île, découvert en 1972 par la Société québécoise d'exploration minière (SOQUEM). Ce dôme de sel est le plus près de la surface aux îles de la Madeleine. La mine, inaugurée en 1982 après des investissements de 125 millions de dollars, produit plus de 1 300 000 tonnes métrique de sel par année, utilisé essentiellement pour le déglacage des routes (MinesQc.com, 2017). La mine a changé de main à quelques reprises, et vient récemment d'être acquise par la société de portefeuille américaine Stone Canyon Industries Holding (CFIM, 2021). Les produits sont distribués sous la marque Windsor.

Le sel est exporté par bateau, vers le Québec, mais aussi vers Terre-Neuve, le Nouveau-Brunswick et les États-Unis. Une grande partie du sel est achetée par le ministère des Transports du Québec, en vertu d'un contrat de 10 ans, signé en 2017 (CFIM, 2021). Selon les prévisions, les activités à la mine pourraient se poursuivre pendant encore 30 ans (MinesQc.com, 2017). Environ 150 personnes travaillent à Mines Seleine, majoritairement des Madelinots (Mines Seleine, 2013).

L'exploitation s'effectue selon la méthode de chambres et piliers. L'empreinte de surface de la mine 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).

L'exploitation de la mine n'aurait pas d'impact sur les ressources en eau souterraine (BAPE, 2013). En effet, son exploitation ne nécessite pas le rabattement de la nappe phréatique, car le diapir de sel ne contient pas d'eau (Mines Seleine, 2013). Le diapir serait recouvert d'une couche de gypse saturée en saumure, donc sans potentiel de dissolution du sel. 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 m³/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.



Coupe schématique illustrant le contexte hydrogéologique du secteur de la mine. Modifié de Mines Seleine (2013).



Chambre intérieure de Mines Seleine.

Conditions

hydrogéologiques

Formations aquifères

Aux îles de la Madeleine, le potentiel d'exploitation des eaux souterraines est évalué en considérant chaque unité géologique comme une formation aquifère distincte. Le potentiel d'exploitation de chacune de ces formations aquifères est évalué selon leurs propriétés hydrauliques, leur épaisseur, leur étendue et l'épaisseur de la lentille d'eau douce qu'elles contiennent.

Les propriétés hydrauliques correspondent à un ensemble de propriétés physiques et de paramètres hydrauliques ayant une influence sur l'écoulement de l'eau dans une unité géologique désignée.

Propriétés hydrauliques considérées:

Porosité totale

Rapport entre le volume des vides et le volume total d'une unité géologique

Porosité de drainage

Rapport entre le volume des vides à travers lequel l'eau peut se drainer par gravité et le volume total d'une unité géologique

Conductivité hydraulique

Paramètre avec lequel on quantifie la perméabilité, soit la facilité avec laquelle l'eau souterraine s'écoule dans une unité géologique

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 que l'ensemble des puits municipaux ont été aménagés. Elle occupe un peu plus du tiers de la superficie de l'archipel. Selon la compilation des données effectuées dans le cadre de cette étude, les roches du Membre de l'Étang-des-Caps ont une conductivité hydraulique moyenne légèrement supérieure à celles du Membre de l'Étang-du-Nord.

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.

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, étant donné que les efforts de recherche en eau souterraine se sont toujours concentrés sur la Formation du Cap aux Meules.

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 adjacents 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.

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 des dépôts meubles et la faible épaisseur de la lentille d'eau douce limitent considérablement l'utilisation de l'eau souterraine qu'elle contient. 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.

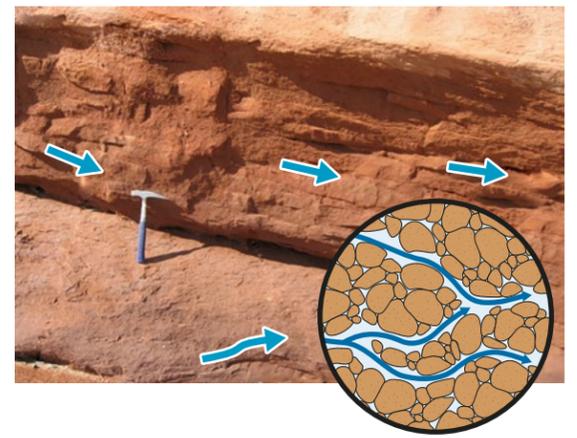


Illustration de l'écoulement de l'eau dans les grès des îles de la Madeleine. L'eau souterraine circule à la fois dans les pores interconnectés (comme dans l'agrandissement) et dans les fractures de la roche (visibles sur la photo).

À noter que ce type d'aquifère est très vulnérable à la contamination par les activités de surface ainsi qu'à l'intrusion d'eau salée.

DÉPÔTS MEUBLES CHENALISÉS

Ces dépôts meubles 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 Grand Entrée et sont composés principalement de sable fin hétérogène. La conductivité hydraulique moyenne des dépôts de cette unité géologique est assez élevée, ce qui en fait une formation aquifère intéressante.

Sur l'île de la Grand Entrée, l'épaisseur des dépôts meubles 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 vulnérable à la contamination par les activités de surface, ainsi qu'à l'intrusion d'eau salée.

Potentiel d'exploitation des formations aquifères

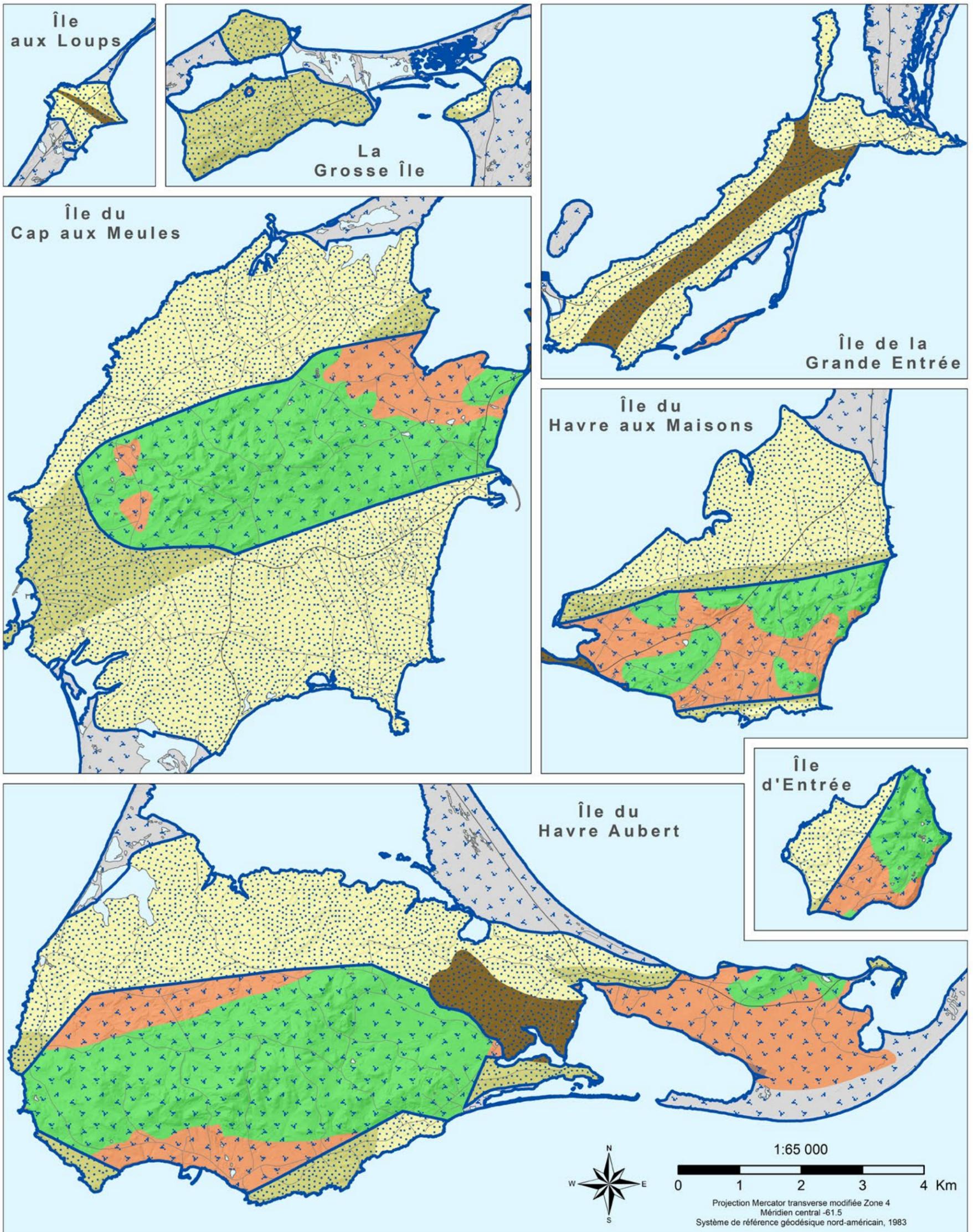
À partir des propriétés hydrauliques déterminées pour chaque unité géologique, de même que leur épaisseur, leur étendue et l'épaisseur de la lentille d'eau douce qu'elles contiennent, un potentiel d'exploitation des formations aquifères a été établi, allant de faible à très élevé. À noter que les aquifères au potentiel moyen à très élevé sont regroupés sous le même thème sur la carte ci-contre, puisque ce sont ceux-ci qui sont d'intérêt pour l'exploitation de la ressource en eau souterraine des îles de la Madeleine.

Tel que mentionné précédemment, 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.

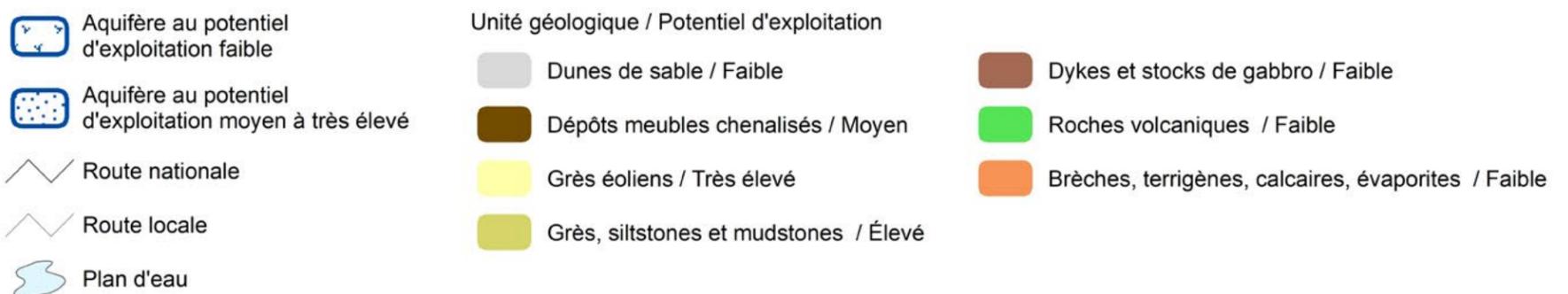
Synthèse des principales caractéristiques des formations aquifères de l'archipel

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	$1,2 \times 10^{-6}$ ^a	10	5	Élevée	Faible

^a Cette valeur correspond à la moyenne des conductivités hydrauliques des modèles hydrogéologiques de chacune des îles obtenue après calibration.



LIMITES ET POTENTIEL D'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES



Sources :

- Potentiel d'exploitation des aquifères : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Piézométrie

La piézométrie, ou niveau piézométrique, correspond à l'élévation du niveau de l'eau souterraine mesurée dans un puits. En conditions de nappe libre, la carte piézométrique permet d'observer les variations de l'élévation du niveau de l'eau dans le sol. Elle permet aussi d'illustrer la direction d'écoulement de l'eau souterraine, qui s'effectue des hauts piézométriques vers les bas piézométriques.

Afin d'obtenir une carte piézométrique d'un territoire donné, une interpolation peut être réalisée entre les différentes mesures ponctuelles de charge hydraulique prises sur ce territoire. Dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, la surface piézométrique, représentée cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m, a plutôt été obtenue par modélisation hydrogéologique, calibrée à l'aide des niveaux d'eau mesurés dans les puits.

ÉLEVATION DE LA SURFACE LIBRE DE LA NAPPE

La carte piézométrique 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, 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.

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 et 15 m respectivement, tandis que sur les îles de la Grande Entrée et aux Loups elle ne dépasse pas 2 m.

GRADIENT HYDRAULIQUE HORIZONTAL

Le gradient hydraulique horizontal correspond à la pente de la surface piézométrique. Sur la carte piézométrique, il correspond au quotient de la différence de charge hydraulique entre deux contours et la distance qui les sépare, mesurés sur une ligne d'écoulement. Ce paramètre est utile pour estimer le débit, soit la quantité d'eau souterraine circulant dans le sol.

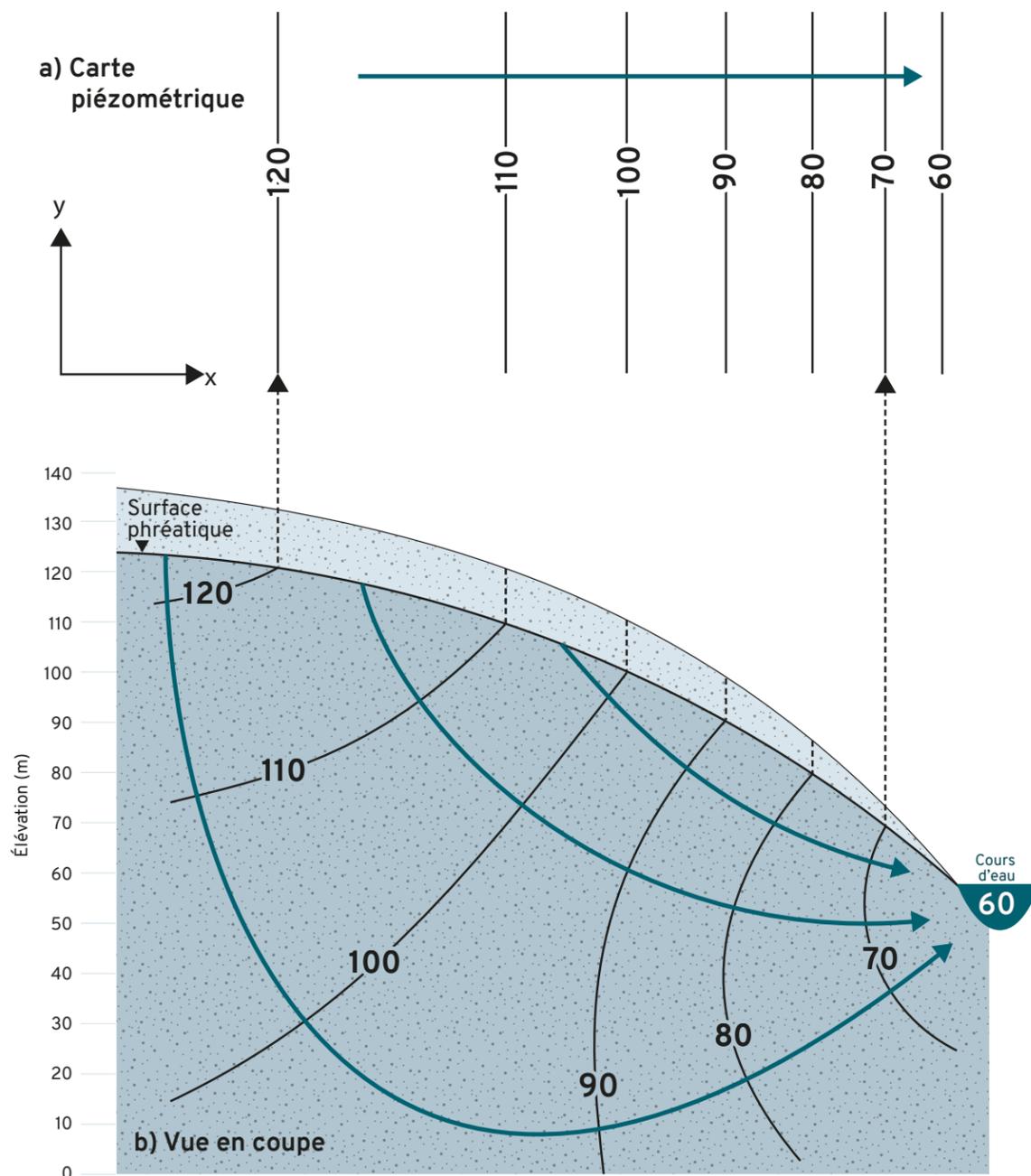
Le gradient hydraulique horizontal est représenté cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m.

Les gradients hydrauliques horizontaux varient de 0 à 0,25 m/m aux îles de la Madeleine. 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).

PROFONDEUR À LA NAPPE

En conditions de nappe libre la profondeur à la nappe correspond à la profondeur de la surface libre de la nappe à partir de la surface du sol. C'est la profondeur attendue de l'eau souterraine lors du forage d'un puits.



a) Sur la carte piézométrique, l'élévation de la surface libre de la nappe est représentée à l'aide de contours de charge hydraulique (mètres au dessus du niveau moyen de la mer). Plus les contours sont rapprochés, plus le gradient hydraulique est élevé. La direction de l'écoulement de l'eau souterraine (flèche bleue) est généralement perpendiculaire aux contours de charge hydraulique. b) La vue en coupe permet d'illustrer les composantes horizontales et verticales de l'écoulement de l'eau souterraine (et des contours de charge hydraulique). On peut observer les zones de recharge et de résurgence de l'eau souterraine. Modifié de Cohen et Cherry (2020).

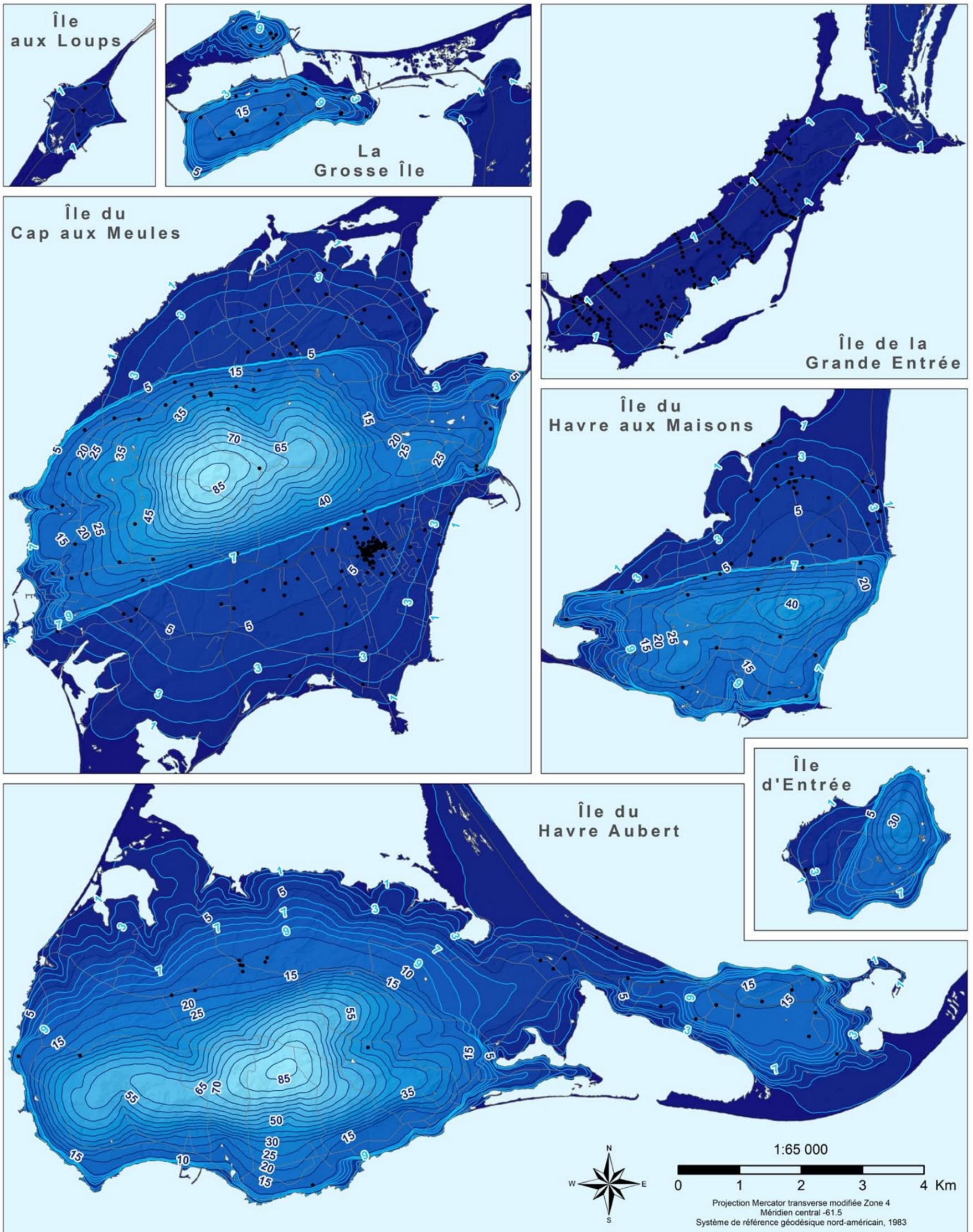
Dans le cadre *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, la profondeur à la nappe a été obtenue en soustrayant les niveaux piézométriques, estimés par modélisation numérique, des élévations du sol. Elle est représentée cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m.

La profondeur à la nappe, varie de 0 à 140 m sur l'ensemble du territoire d'étude. Elle 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, à proximité du 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. La profondeur à la nappe est très faible, en moyenne de moins de 1 m, au droit des dunes de sable.

La profondeur à la nappe 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.



PIÉZOMÉTRIE

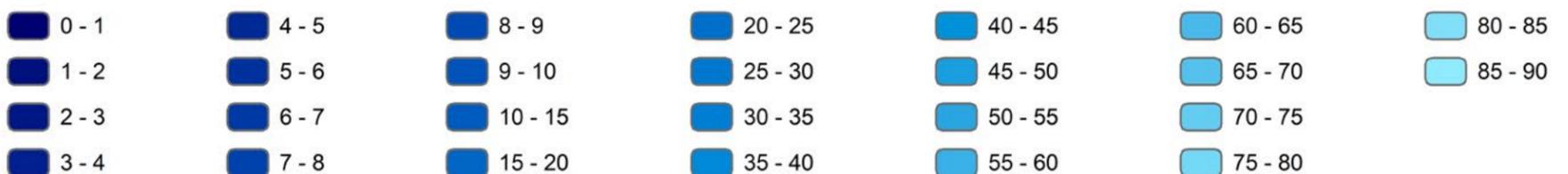
• Observation utilisée pour la modélisation numérique

— Courbe de niveau (équidistance de 1 m)
— Courbe de niveau (équidistance de 10 m)

— Route nationale
— Route locale

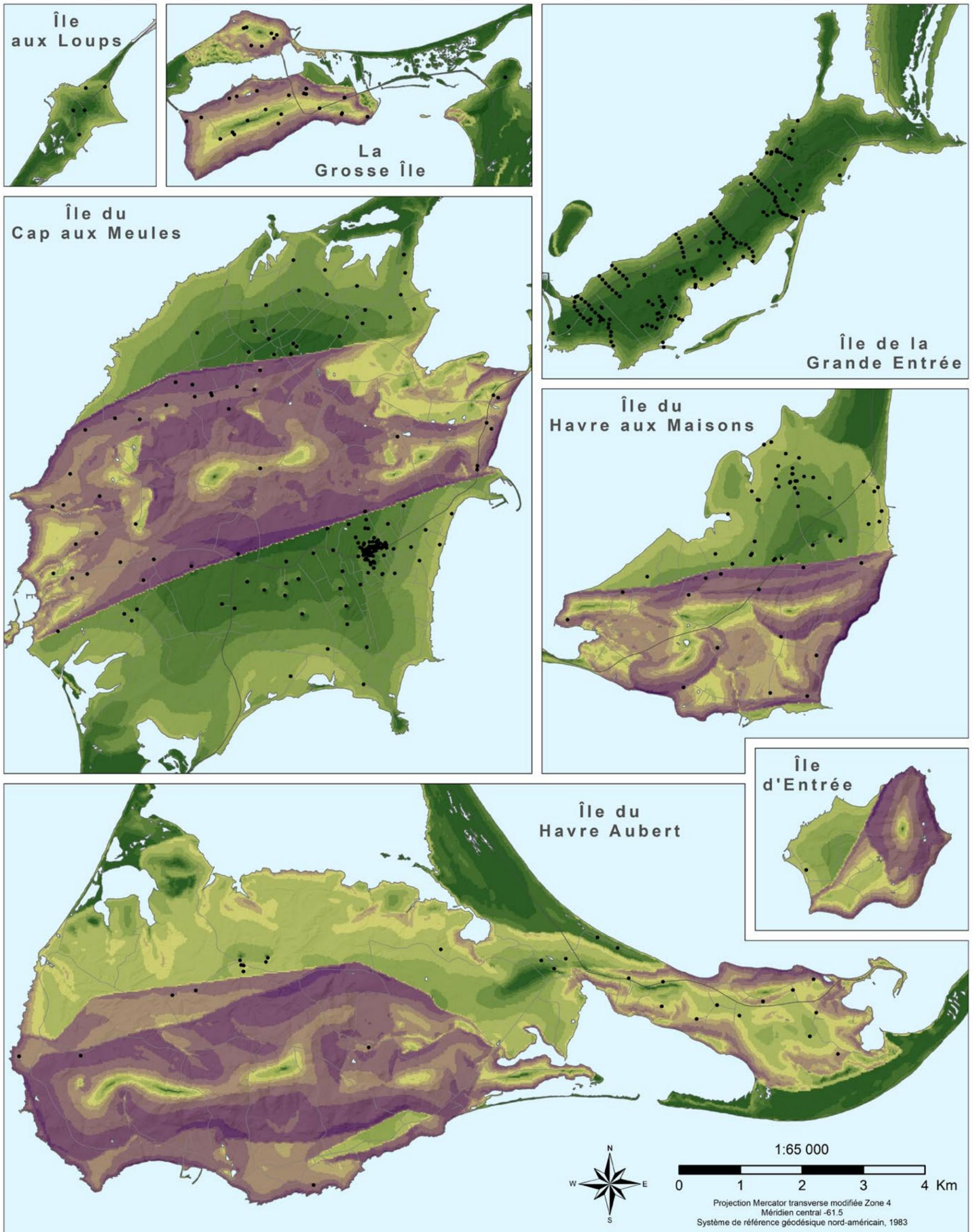
Plan d'eau

Piezométrie (mètre par rapport au niveau moyen des mers)



Sources :

- Estimation de la piézométrie : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

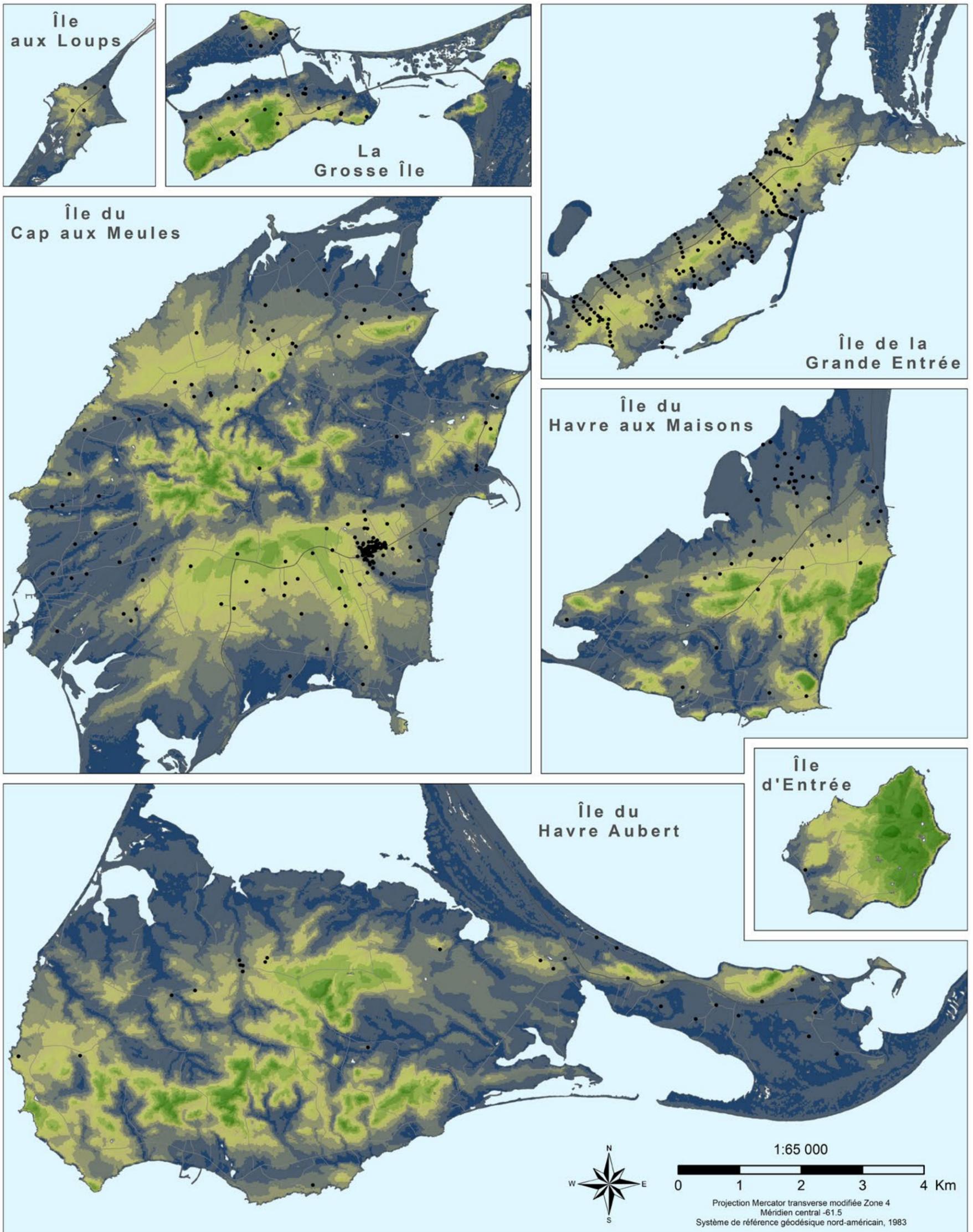


GRADIENTS HYDRAULIQUES HORIZONTALS

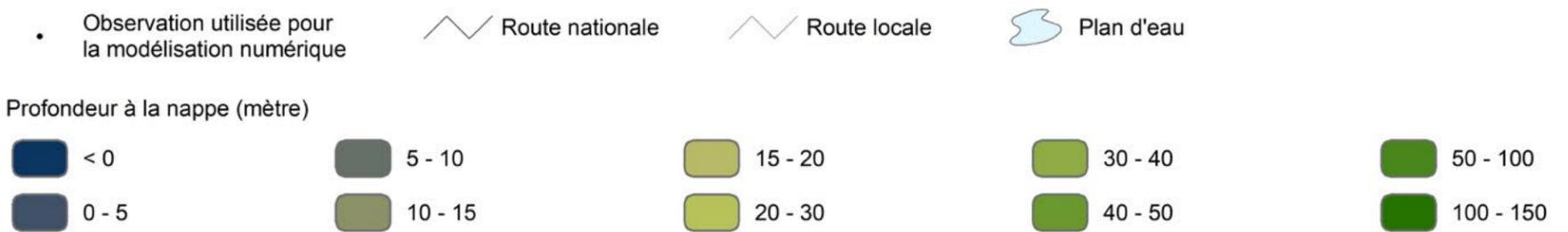


Sources :

- Gradients hydrauliques horizontaux : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)



PROFONDEUR À LA NAPPE



Sources :

- Estimation de la profondeur à la nappe : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

SUIVIS PIÉZOMÉTRIQUES

Les suivis piézométriques dans des puits d'observation permettent d'observer les variations saisonnières de la surface phréatique ainsi que les tendances à long terme.

De nombreux suivis piézométriques ont été réalisés aux îles de la Madeleine au fil du temps. Les mesures sont issues des puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 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 *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*. 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 du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques sont d'au plus 0,7 m. 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 naturelles saisonnières d'un peu moins de 1 m.

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. 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).

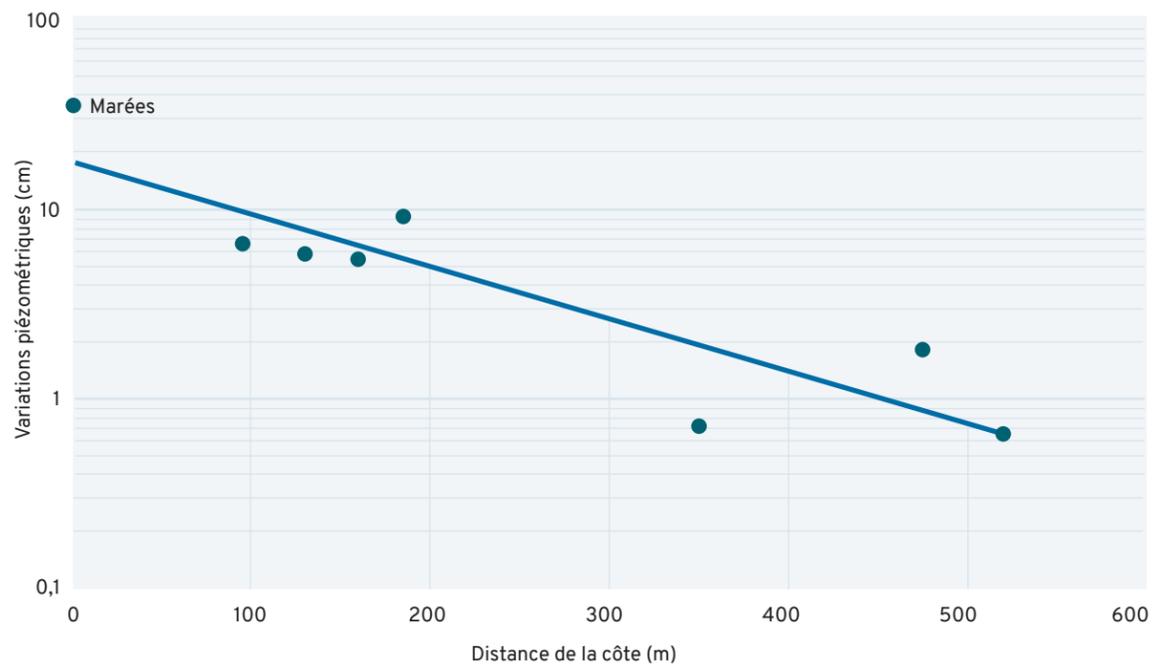
Pour l'île du Havre Aubert, seulement quatre puits ont fait l'objet d'un suivi piézométrique, deux provenant de l'ancien suivi du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et deux piézomètres à proximité des puits d'alimentation municipaux. Trois des puits sont situés 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, 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, 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.

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. La sélection sur la carte ci-contre a été faite dans le but d'illustrer les puits ayant le plus de données et étant les plus représentatifs d'un secteur. Dû au nombre important de puits d'alimentation municipaux sur cette île, 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 ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (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.

EFFET DES MARÉES

Les marées affectent le niveau de l'eau dans les puits situés près des côtes. Une analyse quantitative a été réalisée, avec les données de sondes installées dans des puits. Le graphique de l'amplitude des variations piézométriques attribuables aux marées selon la distance de la côte est illustré ci-dessous et démontre 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.



Amplitude des variations de niveau d'eau mesurée dans des puits attribuables à la marée selon la distance à la côte. Les points correspondent à des puits dans lesquels ces variations ont été mesurées et quantifiées par analyse fréquentielle. La droite correspond à une régression linéaire.

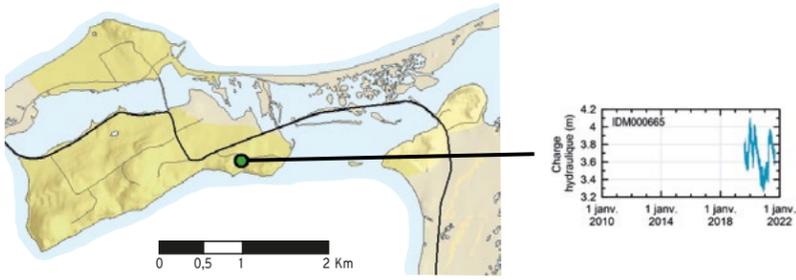


Prise d'une mesure ponctuelle d'un niveau d'eau dans un puits à l'aide d'une sonde avec ruban gradué, île de la Grande Entrée.

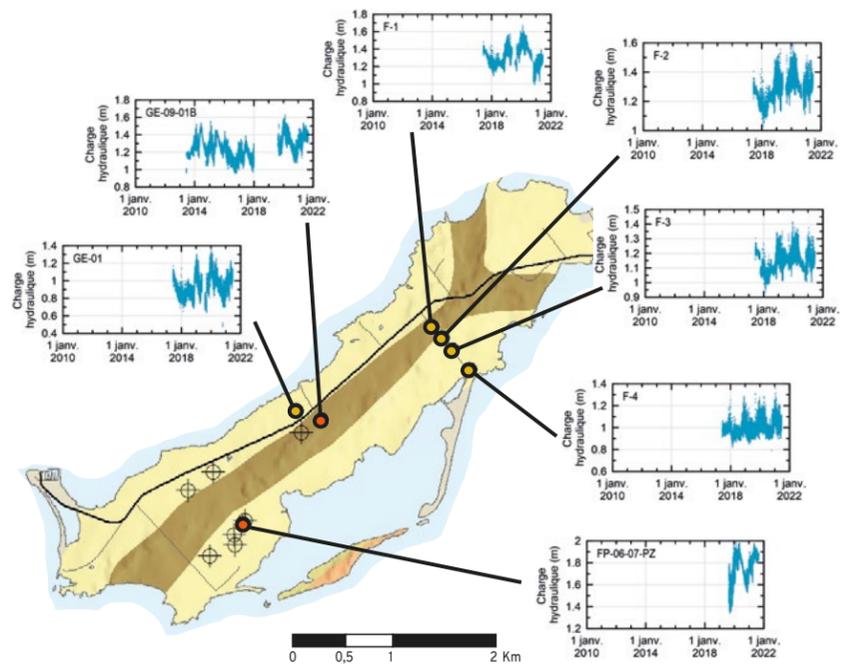


Travaux d'estimation de la perméabilité d'un puits à l'aide d'un système d'obturateurs pneumatiques, île de la Grande Entrée.

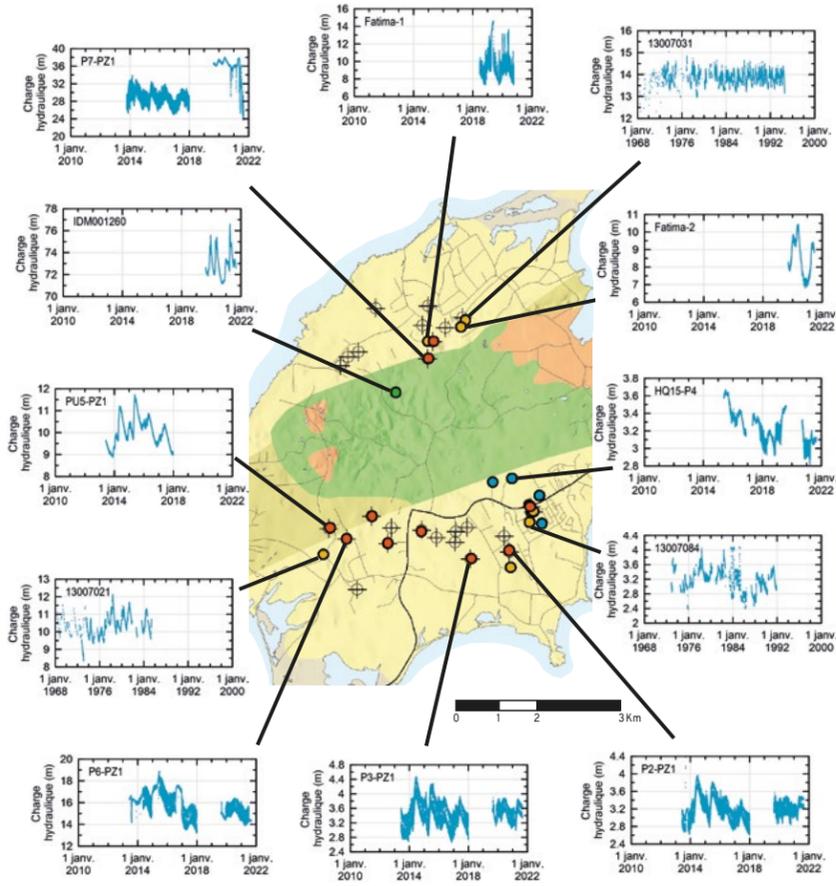
La Grosse Île



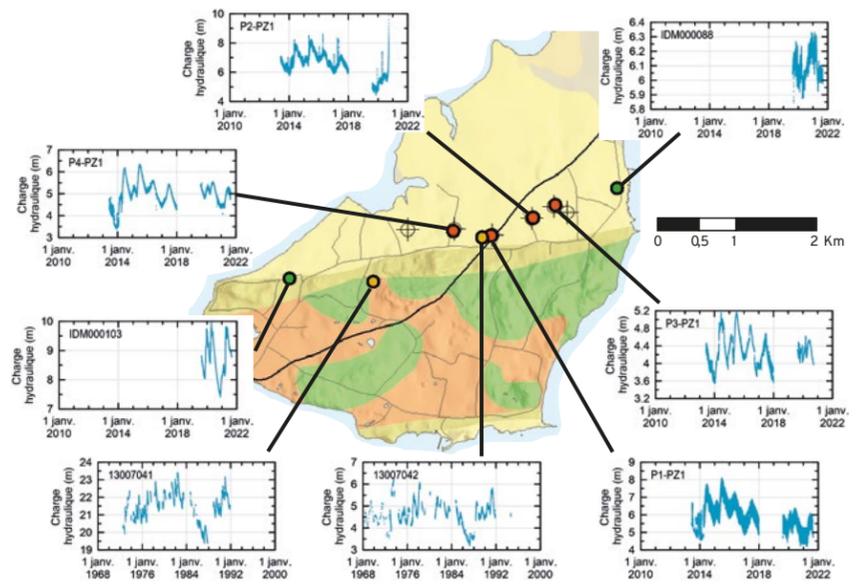
Île de la Grande Entrée



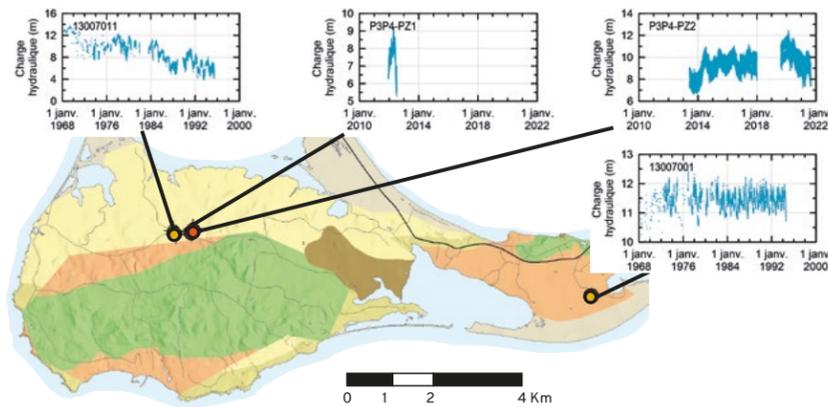
Île du Cap aux Meules



Île du Havre aux Maisons



Île du Havre Aubert



Puits d'observation

- Municipal
- MELCC
- Hydro-Québec
- Université Laval

Puits de pompage

- ⊕ Municipal

Unité géologique

- Tombolos de sable
- Dépôts chenalisés de dépôts meubles
- Membre de l'Étang-des-Caps
- Membre de l'Étang-du-Nord
- Formation du Cap au Diable
- Formation du Havre aux Maisons

Suivi piézométrique pour une sélection de puits de l'archipel.



Puits F-1 du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec, à l'île de la Grande Entrée.



Puits Fatima-1 du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec, à l'île du Cap aux Meules.



Puits HQ15-P4 d'Hydro-Québec, à l'île du Cap aux Meules.

Position de l'interface eau douce - eau salée

La connaissance de la position de l'interface eau douce - eau salée est essentielle afin d'établir des mesures de gestion durable de l'eau souterraine douce.

L'élévation de l'interface de l'interface eau douce - eau salée est une sortie des modèles d'écoulement souterrains calibrés, sur une grille de 20 m par 20 m. Les profondeurs sont ensuite calculées en soustrayant les élévations de l'interface des élévations du sol.

Les élévations calculées de l'interface eau douce - eau salée 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. 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 endroits où la position de l'interface modélisée atteint la base du modèle, il est fort probable qu'en réalité, l'interface soit plus profonde.

Les cartes de l'élévation et de la profondeur de l'interface eau douce - eau salée sont relativement semblables pour chacune des îles, 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 plus pour les profondeurs.

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. 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, mais elle ne peut pas être calculée, car elle serait biaisée par le fait que la limite inférieure des modèles est atteinte. La profondeur 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.

Épaisseur de la lentille d'eau douce

La forme de la nappe d'eau douce qui flotte par contraste de densité sur des eaux souterraines salées ressemble à une lentille lorsqu'elle est visualisée en coupe traversant complètement une île. La nappe d'eau douce est beaucoup plus épaisse au centre des îles qu'en bordure de mer.

L'épaisseur de la lentille d'eau douce se calcule en soustrayant la profondeur à la nappe à la profondeur de l'interface eau douce - eau salée. Elle est représentée cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m.

Les épaisseurs les plus importantes s'observent sous les buttes centrales. Comme pour la modélisation de l'interface eau douce - eau salée, 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.

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. 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 *Formations aquifères*. 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 Mm³. En considérant les porosités totales retenues pour chaque unité géologique à la section *Formations aquifères*, l'eau souterraine occuperait entre 20 à 30 % du volume total de ces aquifères, ce qui donne un volume total d'environ 3 500 Mm³ d'eau. Enfin, en considérant les porosités de drainage retenues pour ces mêmes unités géologiques à la section *Formations aquifères*, qui sont de 75 % de celles des porosités totales respectives, environ 2 700 Mm³ d'eau souterraine serait disponible aux îles de la Madeleine.

Les deux plus grandes îles, soit celles du Cap aux Meules et du Havre Aubert, possèdent autour de 1 Mm³ chacune d'eau exploitable. À elles deux, elles comptent pour 78 % de toute l'eau exploitable de l'archipel. L'île du Havre aux Maisons suit, représentant 11 % du total de l'eau exploitable. Puis, par ordre décroissant, viennent la Grosse Île, l'île de la Grande Entrée, l'île d'Entrée et l'île aux Loups, correspondant à des proportions de 6, 3, 2 et moins de 1 %, respectivement, de l'eau exploitable des îles de la Madeleine.

En général, plus la superficie d'une île est grande, 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, résultant en une lentille d'eau douce plus mince.

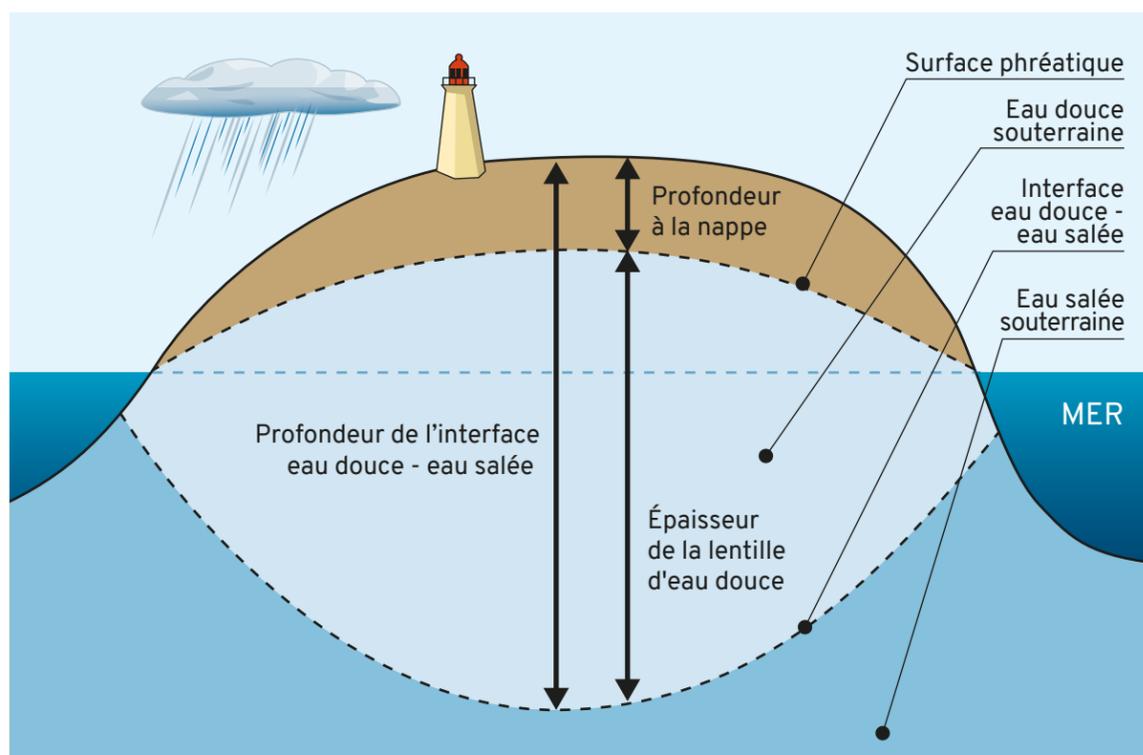
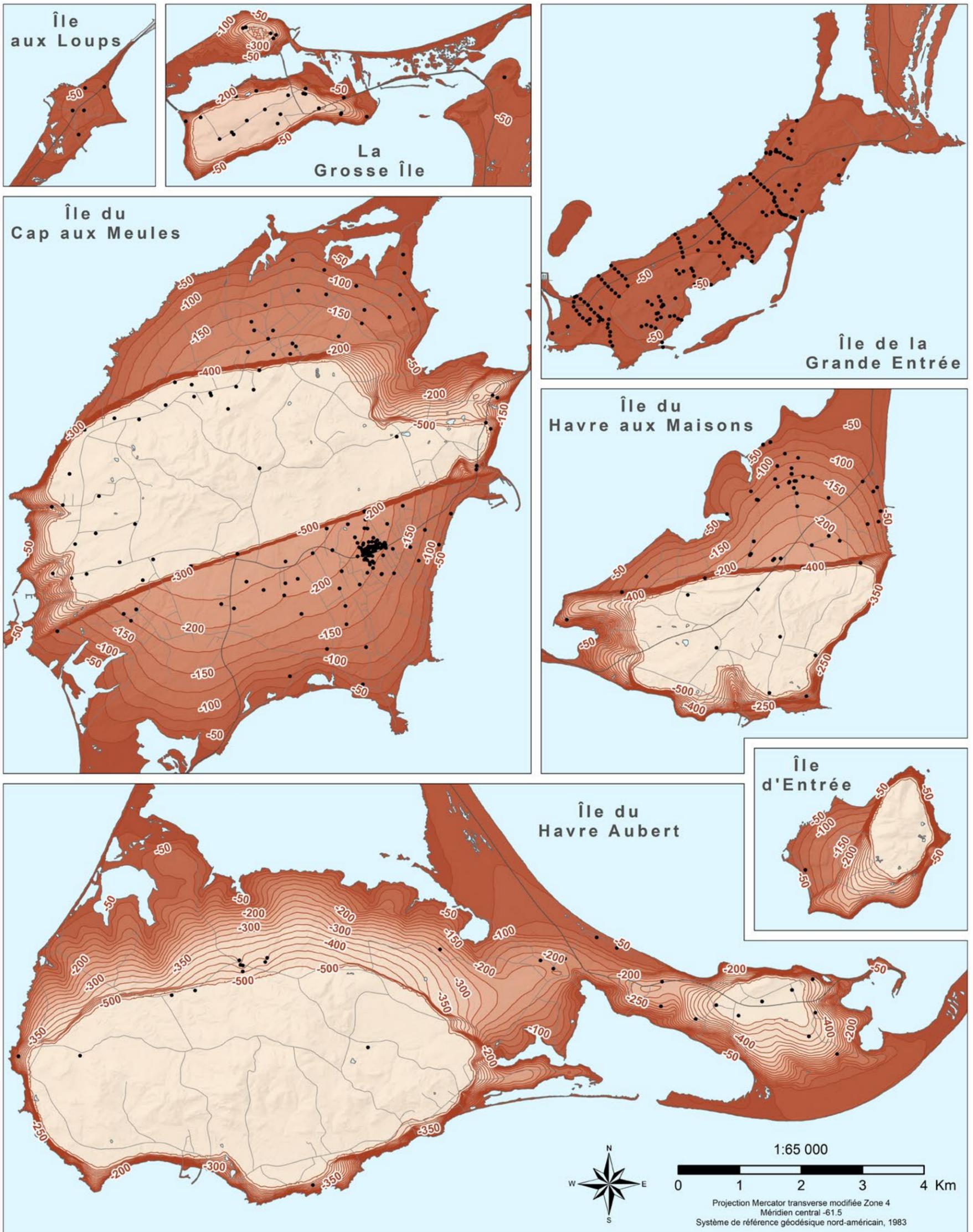


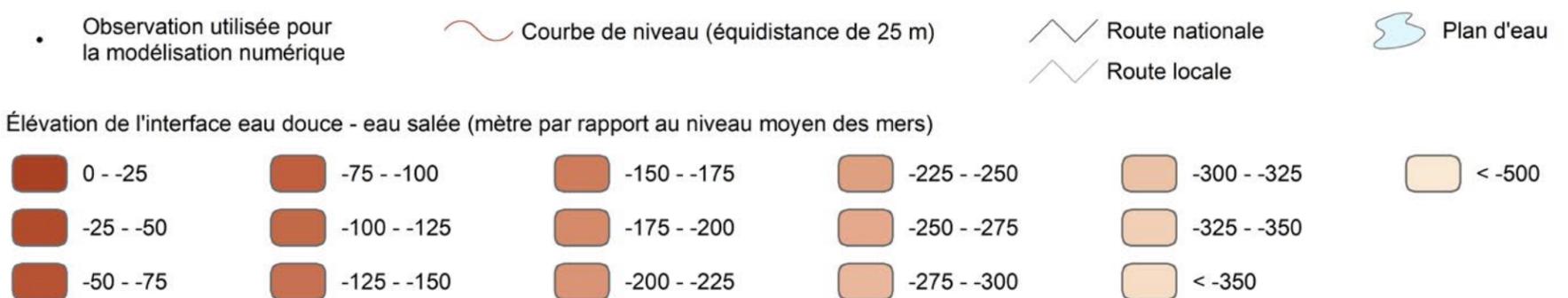
Schéma illustrant la profondeur à la nappe, la profondeur de l'interface eau douce - eau salée et l'épaisseur de la lentille d'eau douce.

Volume d'eau douce disponible par île

Île	Volume d'eau douce disponible (Mm ³)	Proportion (%)
Du Cap aux Meules	1 159	42,7
Du Havre Aubert	955	35,2
Du Havre aux Maisons	311	11,4
Grosse Île	151	5,6
De la Grande Entrée	76	2,8
D'Entrée	54	2,0
Aux Loups	9	0,3
Total	2 715	100,0

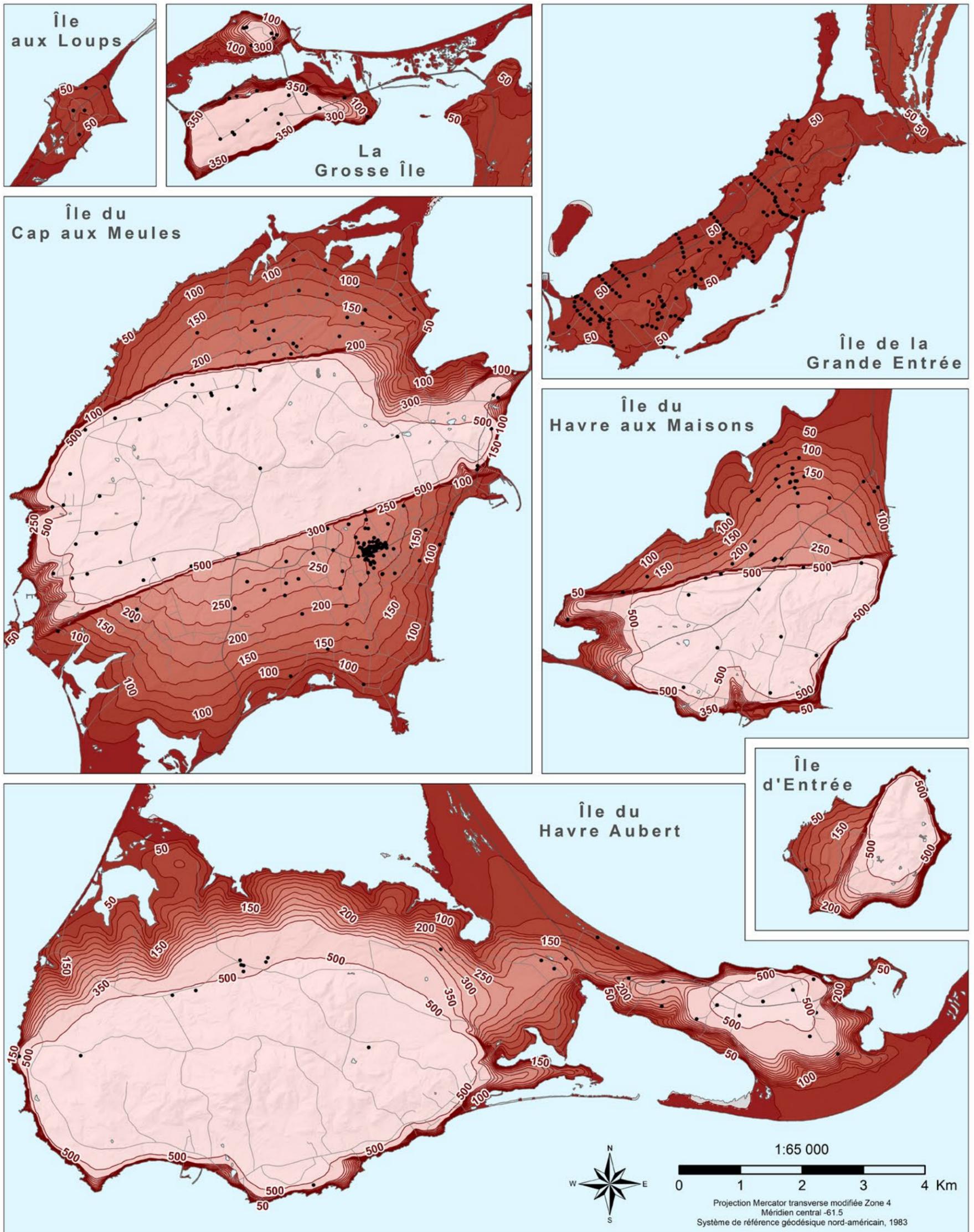


ÉLÉVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE

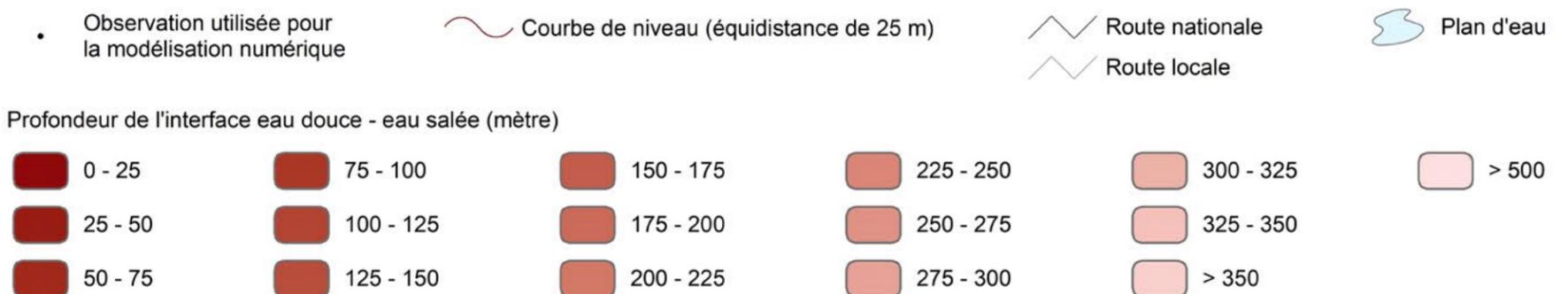


Sources :

- Estimation de l'élévation de l'interface eau douce – eau salée : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

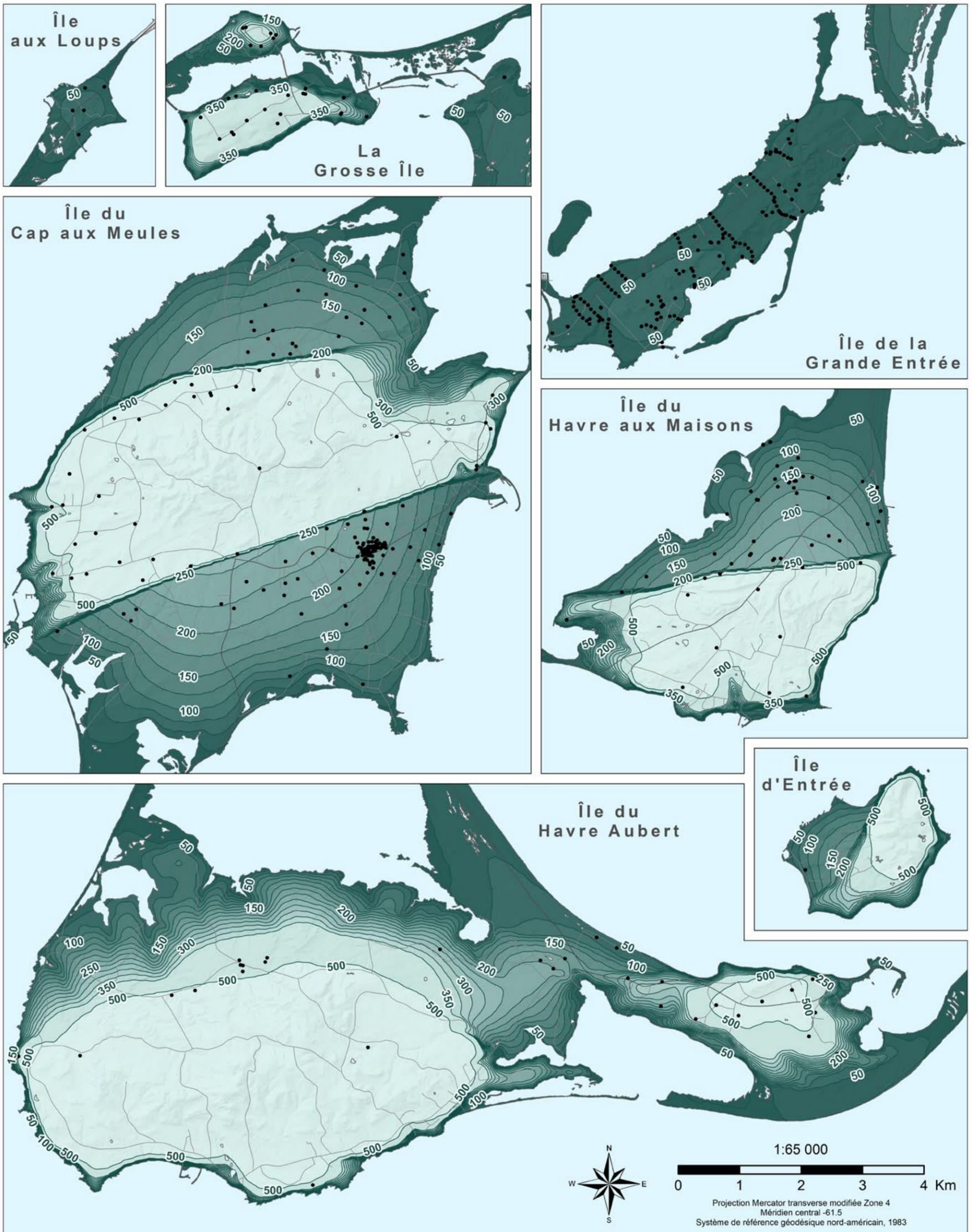


PROFONDEUR DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALÉE

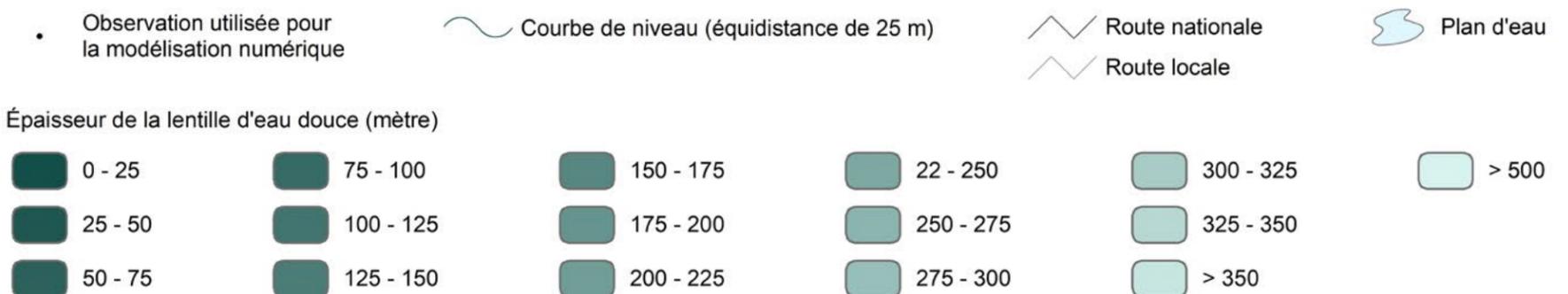


Sources :

- Estimation de la profondeur de l'interface eau douce – eau salée : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)



ÉPAISSEUR DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE



Sources :

- Estimation de l'épaisseur de la lentille d'eau douce : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique correspond au calcul de la quantité d'eau qui entre, sort, s'accumule, ou diminue d'un système hydrologique. Les composantes les plus importantes du bilan aux îles de la Madeleine sont l'évapotranspiration, le ruissellement, la recharge, les résurgences et les pompages municipaux. La comparaison entre les volumes d'eau de ces différentes composantes du bilan permet d'évaluer la durabilité de l'exploitation de la ressource.

L'apport en eau se fait via les **précipitations**, représentant l'intrant. Ces précipitations se partitionnent en trois parties, soit l'**évapotranspiration**, le **ruissellement de surface** et la **recharge**. Ainsi, l'eau retourne dans l'atmosphère, circule dans les cours d'eau de surface ou s'infiltre dans le sol pour réalimenter l'aquifère.

La quantité d'eau qui recharge les aquifères annuellement peut sortir du système sous forme de **résurgences** pour rejoindre le réseau hydrographique de surface. En milieu terrestre, les résurgences se retrouvent là où l'élévation de la nappe phréatique dépasse la surface du sol, soit à proximité des cours d'eau et des milieux humides. En mer, l'eau douce souterraine fait résurgence près des côtes. Le **pompage** des puits municipaux compte aussi dans le bilan de l'eau qui ressort du système (les pompages domestiques sont négligés).

La modélisation numérique a permis d'obtenir un bilan hydrologique moyen annuel pour une période de 30 ans (juillet 1989 à juin 2019) en considérant que la quantité d'eau souterraine dans les aquifères demeure constante. Les différentes composantes du bilan sont représentées cartographiquement sous la forme d'une grille régulière de 20 m par 20 m.

Au total, aux îles de la Madeleine, la recharge et l'évapotranspiration sont les composantes majeures du bilan hydrologique, comptant pour, respectivement, 52 % et 46 % des précipitations. La très petite part de 2 % des précipitations qui ruisselle sans s'infiltrer permet de contribuer au développement du réseau hydrographique de surface.

RECHARGE

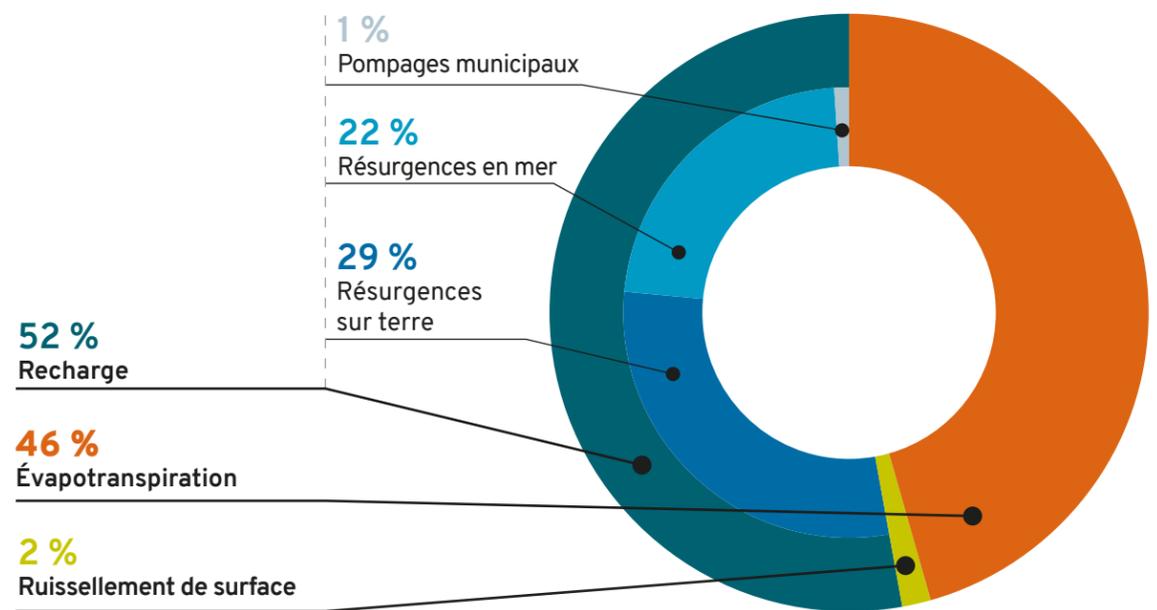
La recharge aux îles de la Madeleine varie de 221 à 738 mm/an, ce qui est relativement élevé par rapport à d'autres régions du Québec, où la recharge moyenne peut varier entre 50 mm/an et 450 mm/an (MELCC, 2022a). Une faible imperméabilisation des surfaces et le bon drainage des sols entraînent un faible ruissellement, favorisant ainsi l'infiltration des précipitations dans le sol. 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 par exemple en zones résidentielles, où les habitations sont très espacées, avec peu de zones imperméables en surface (ex.: asphalté, 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. Les zones où la recharge est inférieure à 400 mm/an sont rares et sont situées sur les routes ou autour des zones humides, où l'infiltration des précipitations est plus difficile.

ÉVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration pour l'ensemble de l'archipel varie de 320 à 628 mm/an. 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. 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. Sur près de la moitié 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.

RUISELLEMENT DE SURFACE

Le ruissellement varie de 0 à 420 mm/an à l'échelle des îles de la Madeleine. Sur la vaste majorité du territoire, le ruissellement est très faible, inférieur à 25 mm/an. 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.



Bilan hydrologique de l'ensemble du territoire modélisé (excluant la majeure partie des cordons dunaires et les petites îles rocheuses non habitées). Les précipitations (pluie et neige) représentent 100 % des entrées d'eau dans le système.

Bilan hydrologique moyen annuel (en mm/an et en % des précipitations) pour la période de juillet 1989 à juin 2019. La somme des résurgences sur terre, des résurgences en mer et des pompages municipaux est égale à la recharge.

Île	Composante du bilan hydrologique en mm/an (% des précipitations)						Précipitations
	Ruissellement de surface	Évapotranspiration	Recharge	Résurgences sur terre	Résurgences en mer	Pompages municipaux	
De la Grande Entrée	21 (2 %)	456 (44 %)	559 (54 %)	0 ^a (0 %)	556 (54 %)	3 (< 1 %)	1036 (100 %)
Grosse Île	28 (3 %)	441 (42 %)	567 (55 %)	330 (32 %)	237 (23 %)	0 (0 %)	
Aux Loups	17 (2 %)	393 (38 %)	626 (60 %)	104 (10 %)	522 (50 %)	0 (0 %)	
Du Havre aux Maisons	13 (1 %)	434 (42 %)	589 (57 %)	299 (29 %)	272 (26 %)	18 (2 %)	
Du Cap aux Meules	14 (1 %)	496 (48 %)	526 (51 %)	281 (27 %)	221 (22 %)	24 (2 %)	
Du Havre Aubert	20 (2 %)	475 (46 %)	541 (52 %)	404 (39 %)	128 (12 %)	9 (1 %)	
D'Entrée	5 (< 1 %)	434 (42 %)	597 (58 %)	110 (11 %)	487 (47 %)	0 (0 %)	
Total ^b	17 (2 %)	473 (46 %)	546 (52 %)	304 (29 %)	228 (22 %)	14 (1 %)	

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

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

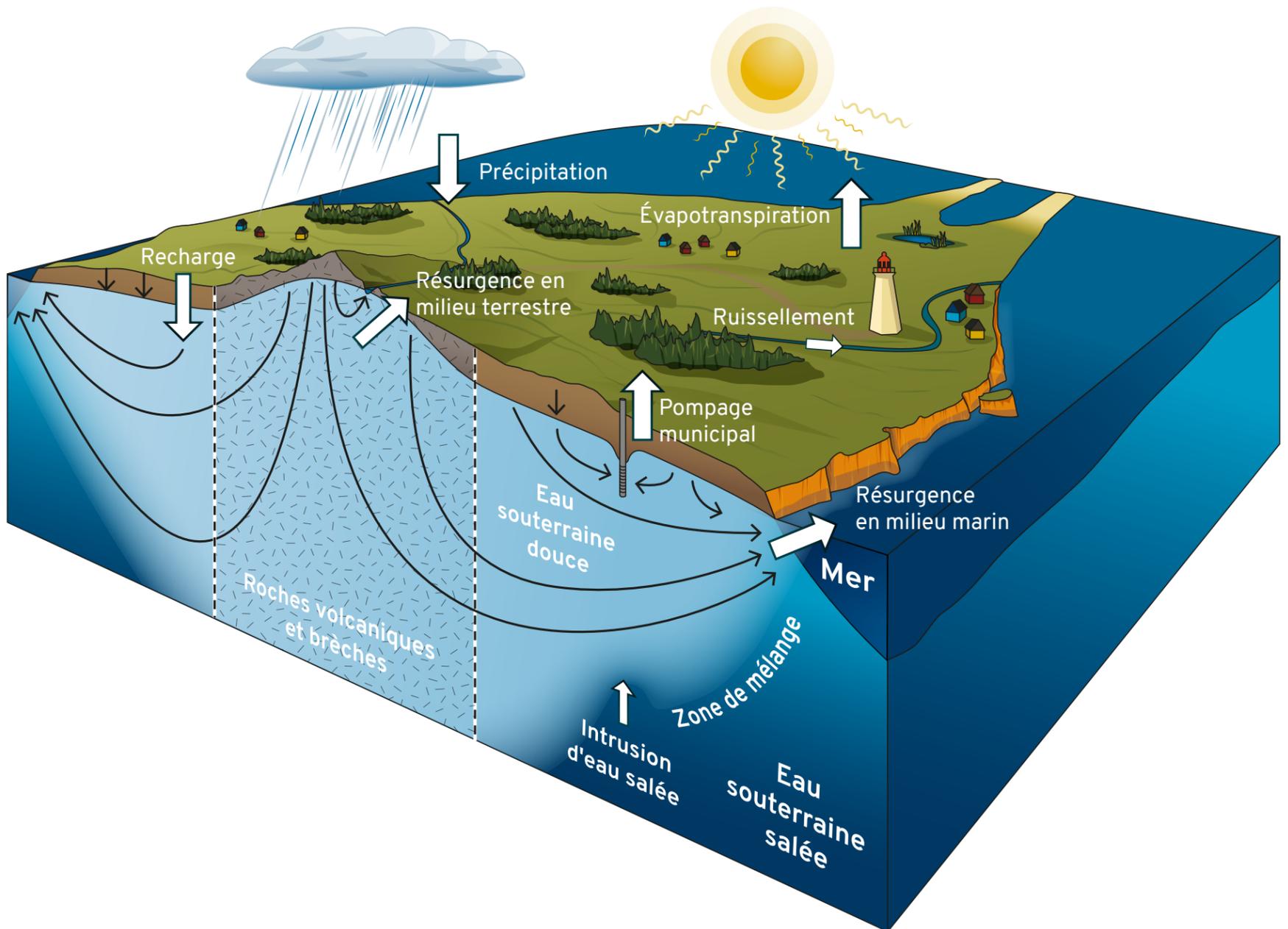
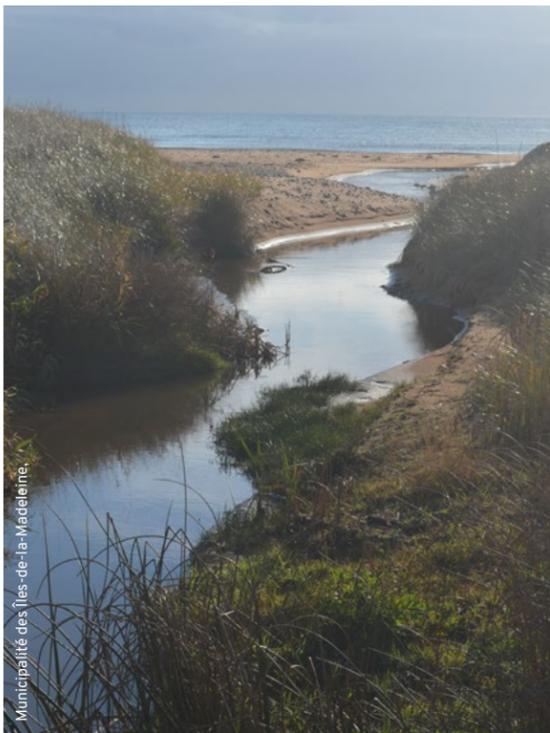


Schéma illustrant les composantes du bilan hydrogéologique.



Cours d'eau côtier.

RÉSURGENCE

Les résurgences sur terre représentent 29 % des précipitations annuelles. Elles se produisent sur environ 16 km², soit 13 % du territoire terrestre modélisé. Les résurgences les plus importantes (> 5 000 mm/an) 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 dunes de sable 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.

La part de la lentille d'eau douce faisant résurgence en mer compte pour 22 % des précipitations. Les résurgences modélisées 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 km² de territoire marin. En général, les résurgences en mer sont un peu plus faibles que celles sur terre. 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 mince et plus les résurgences d'eau douce diminuent.

La part des résurgences sur terre ou en mer 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).

Pompages municipaux

La quantité d'eau pompée pour alimenter les réseaux d'aqueduc municipaux représente une très faible part du bilan hydrologique, au maximum 2,3 % des précipitations sur l'île du Cap aux Meules, et en moyenne de 1,4 % pour l'ensemble de l'archipel.

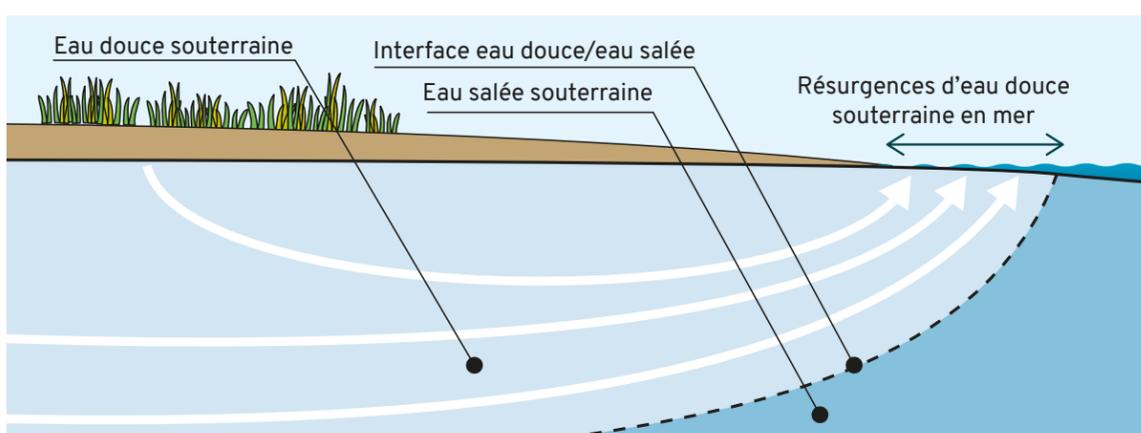
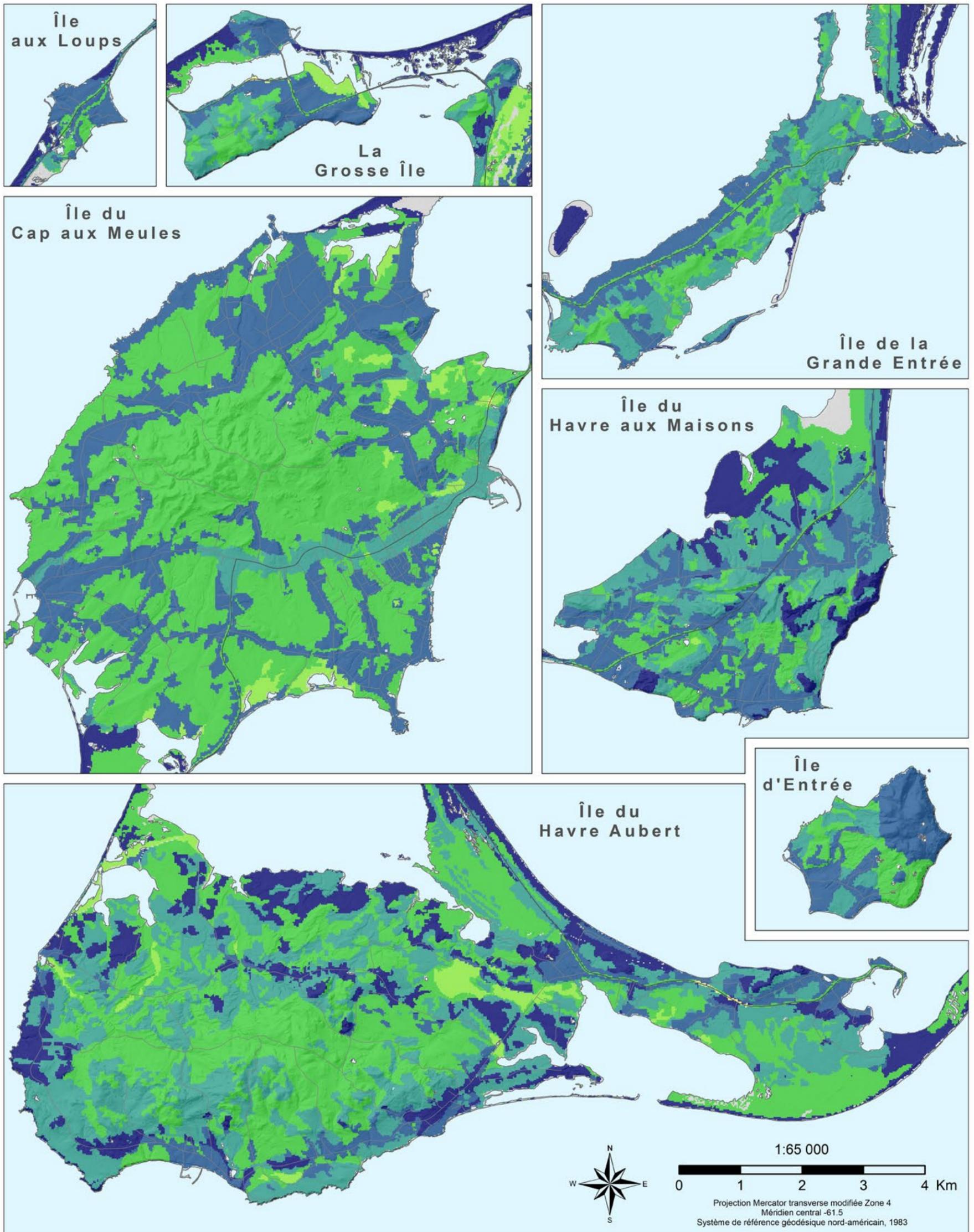


Schéma illustrant le contexte hydrogéologique à proximité de la côte. Les résurgences d'eau souterraine douce sont indiquées par les flèches blanches.



Forage manuel de mini-piézomètres servant à estimer les résurgences sur la plage de la Martinique, île du Cap aux Meules.

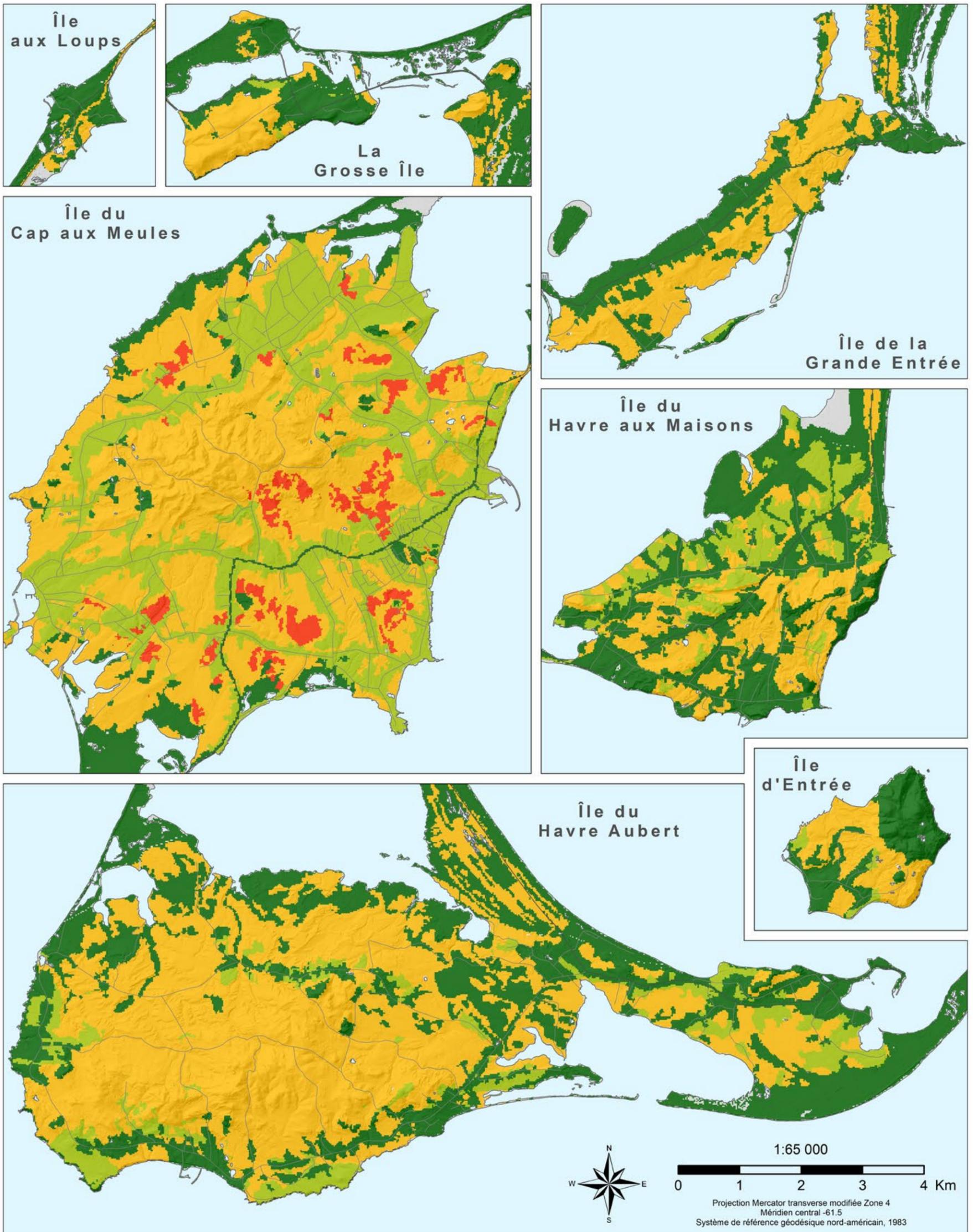


RECHARGE



Sources :

- Estimation de la recharge : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

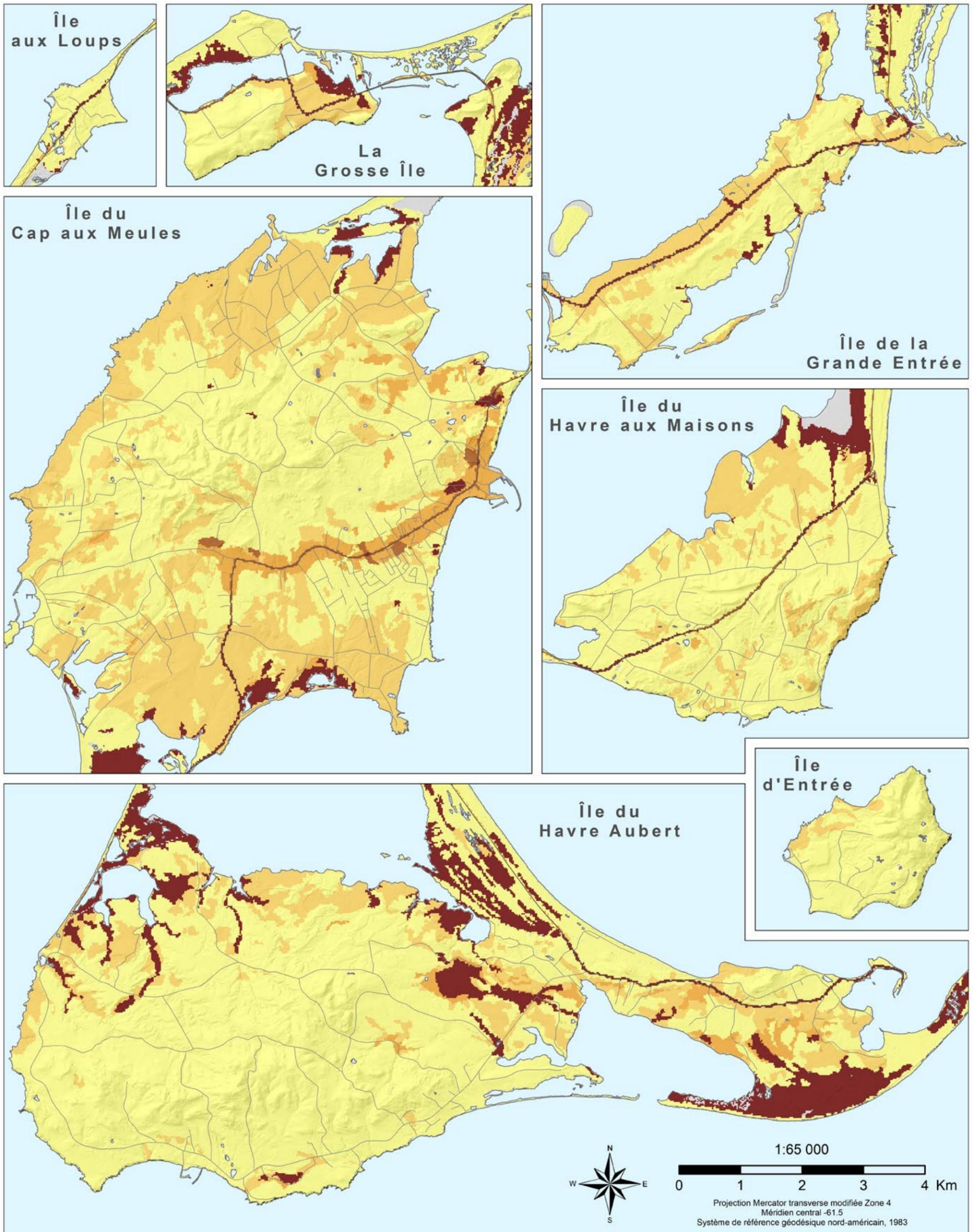


ÉVAPOTRANSPIRATION

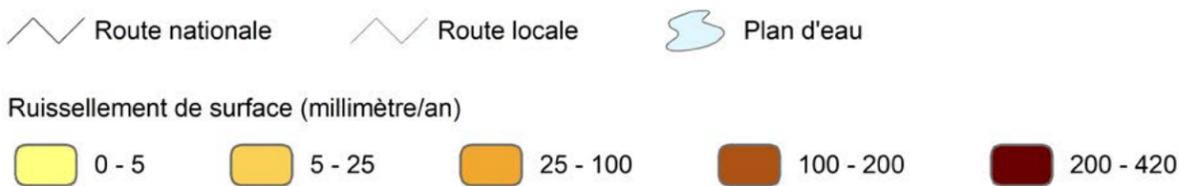


Sources :

- Estimation de l'évapotranspiration : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

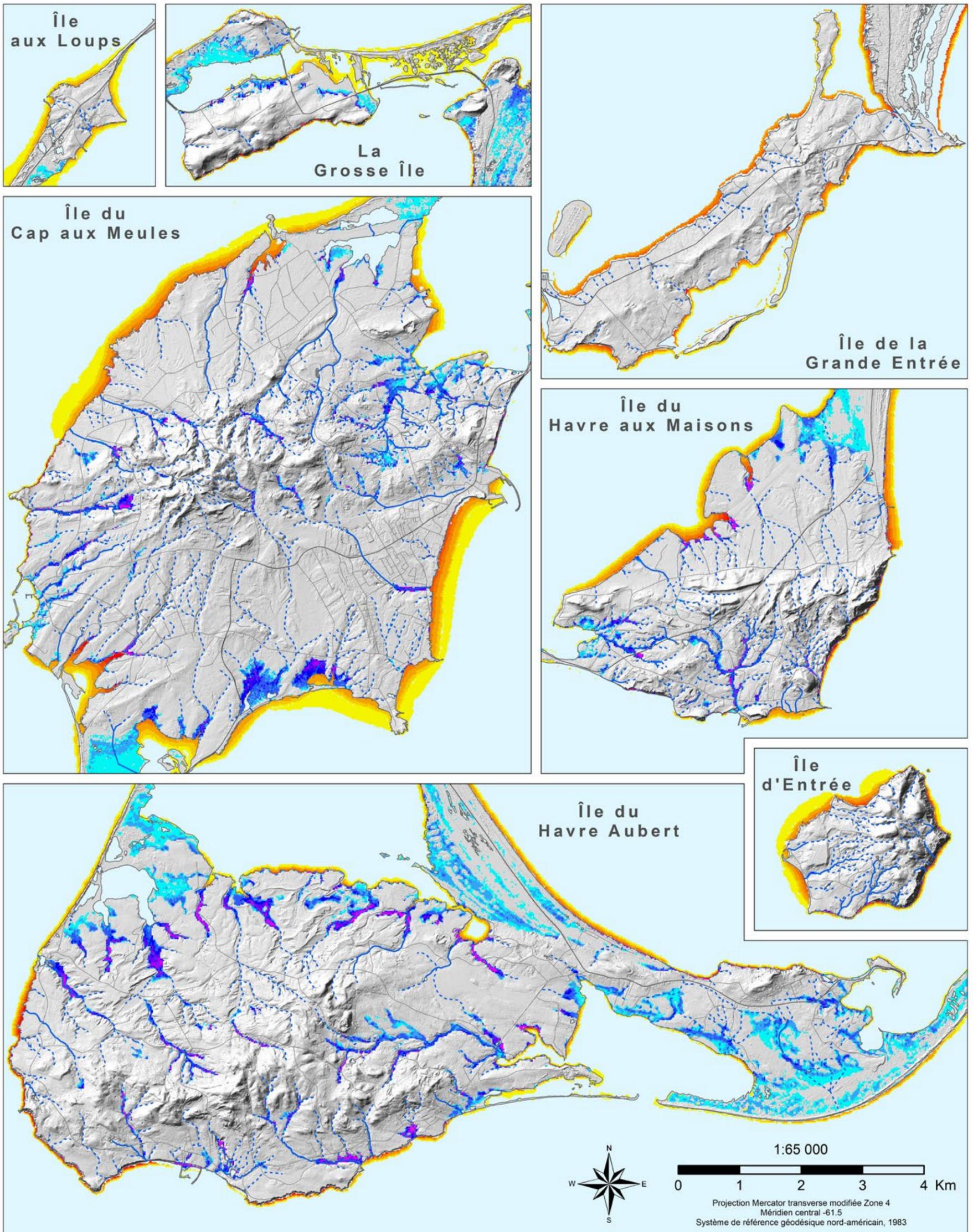


RUISSELLEMENT DE SURFACE



Sources :

- Estimation du ruissellement de surface : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)



RÉSURGENCES D'EAU SOUTERRAINE



Sources :

- Estimation des résurgences : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

VARIATIONS SAISONNIÈRES

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

Au **printemps**, la hausse des températures et le départ de la croissance des végétaux provoquent une remontée de l'évapotranspiration. De plus, la fonte des neiges produit une certaine quantité d'eau liquide qui, avec les précipitations, s'infiltre dans le sol pour recharger la nappe phréatique. La recharge printanière moyenne est la plus forte de l'année, et représente en moyenne 220 mm pour les mois d'avril et de mai combinés, c'est-à-dire près de 40 % de la recharge moyenne annuelle totale. Bien que le ruissellement demeure toujours très faible tout au long de l'année, la fonte printanière provoque aussi une remontée notable du ruissellement, qui représente environ 50 % du ruissellement annuel.

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. L'évapotranspiration atteint sa moyenne maximale de près de 75 mm/mois en juillet. De juin à août, la recharge moyenne ne dépasse pas les 15 mm/mois.

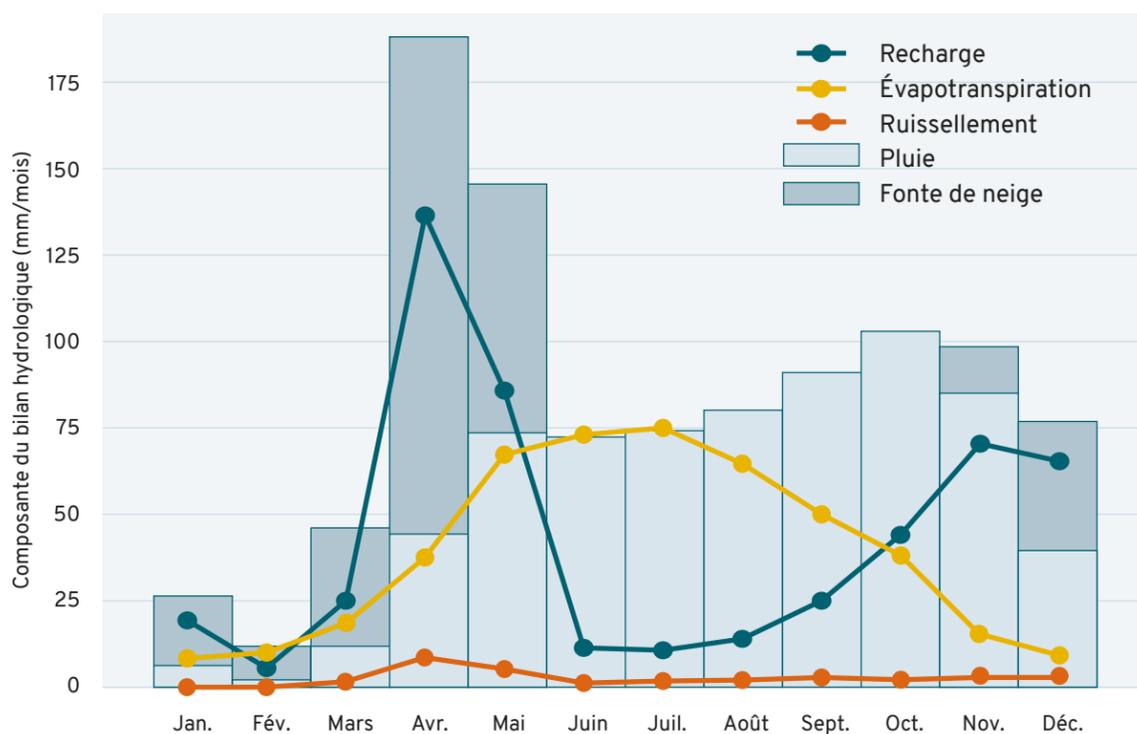
En **automne**, la baisse des températures et le ralentissement de la consommation en eau par les végétaux font en sorte que l'évapotranspiration diminue graduellement. Par contre, les précipitations redeviennent plus importantes. Ainsi, la recharge remonte de septembre à décembre et atteint un maximum 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.

En **hiver**, les précipitations liquides sont faibles (20 mm au total de janvier à mars), et due à l'absence d'activité végétale, l'évapotranspiration est très basse (de moins de 10 mm/mois). Elle n'est cependant pas nulle, car la composante « évaporation » est encore un peu active. En raison du gel au sol et étant donné qu'il y a des précipitations sous forme neigeuse, la recharge demeure sous la barre des 25 mm/mois. Les épisodes de fonte de neige font tout de même augmenter l'eau liquide disponible à un total de 85 mm pour la période, soit 8 % des précipitations annuelles.

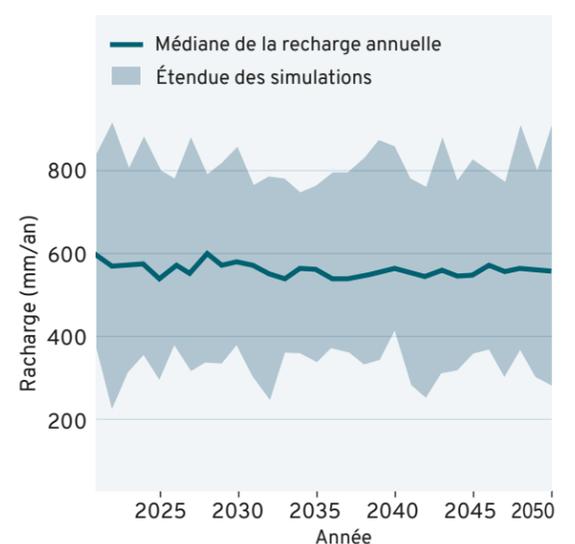
RECHARGE PROJÉTÉE EN 2050

Afin d'alimenter les modèles numériques visant l'élaboration d'outils quantitatifs pour la gestion de la ressource qui prennent en considération l'effet des changements climatiques, 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 (Charron, 2016) discutés à la section *Climat*. 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 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 des modèles numériques montrent que l'effet de l'augmentation des températures prévue aurait très peu d'effet sur les valeurs annuelles de recharge.



Valeurs mensuelles moyennes des composantes du bilan hydrologique (1989-2019).



Médiane de la recharge annuelle simulée entre 2021 et 2050 pour les 72 scénarios climatiques.



Vue sur la Lagune du Havre aux Maisons et la pointe ouest de l'île du Havre aux Maisons.

COMPARAISON DES VOLUMES D'EAU DISPONIBLES, RECHARGÉS ET UTILISÉS

Les volumes d'eau qui rechargent les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé ont été calculés. Ils correspondent 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. Ces volumes ont été comparés aux volumes d'eau disponibles contenus dans ces mêmes aquifères, présentés à la section *Volume d'eau disponible*. Ils sont obtenus de la multiplication du volume de la lentille d'eau douce par les porosités de drainage des unités géologiques.

Annuellement, à l'échelle des îles de la Madeleine, le volume associé à la recharge annuelle est de 49,0 Mm³, ce qui correspond à 1,8 % du volume total d'eau douce disponible de 2 700 Mm³. La recharge annuelle est proportionnelle à la superficie de chaque île, c'est donc naturellement sur les plus grandes îles qu'elle est le plus élevée, avec 19,1 Mm³ pour l'île du Cap aux Meules et 15,1 Mm³ pour l'île du Havre Aubert. Toutefois, ces volumes ne représentent que 1,6 % du volume d'eau douce disponible de ces îles, 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, le volume d'eau douce qu'elles contiennent par rapport à une unité de surface est plus faible que pour les autres îles.

Les estimations annuelles de la consommation totale de l'eau, présentées à la section *Usage de la ressource*, ont été comparées aux volumes d'eau rechargés. Les usages totaux considèrent les volumes d'eau utilisés par tous les secteurs d'activité combinés (résidentiel, agricole, et industriel, commercial et institutionnel). Les volumes d'eau distribués par les réseaux d'aqueduc de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, abordés à la section *Systèmes de distribution en eau potable*, ont aussi été comparés aux volumes de la recharge annuelle des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. 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.

La totalité de l'eau utilisée annuellement aux îles de la Madeleine, tous usages confondus, s'élève à 2,2 Mm³, dont 2,0 Mm³ 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 calculée, 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 Mm³ 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 sur cette île. La part la plus faible de la recharge consommée annuellement s'observe sur l'île de la Grande Entrée, avec 0,9 %.

Comparaison des volumes de la recharge avec les volumes d'eau douce disponible dans les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé

Comparaison de l'eau consommée avec les volumes de la recharge dans les aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé

Île	EAU DOUCE DISPONIBLE Volume (Mm ³)	RECHARGE	ESTIMATION DE LA CONSOMMATION EN EAU TOTALE	POMPAGES MUNICIPAUX
		Volume annuel (Mm ³ /an) Part du volume d'eau douce disponible rechargée annuellement	Volume annuel (Mm ³ /an) Part de la recharge consommée annuellement	Volume annuel (Mm ³ /an) Part de la recharge pompée annuellement
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	1159	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 %)	-
Total	2 715	49,0 (1,8 %/an)	2,24 (4,6 %)	2,04 (4,2 %)



Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes

Vue aérienne de Grosse-Île-Nord.

Qualité de l'eau souterraine

Les usages possibles de l'eau souterraine dépendent non seulement de sa quantité, mais aussi de sa qualité, c'est-à-dire de la concentration de différents composés bactériologiques ou chimiques dans l'eau.

Afin d'évaluer la qualité de l'eau souterraine aux îles de la Madeleine, 48 échantillons d'eau ont été prélevés dans autant de puits par l'Université Laval. Ces travaux ont été faits en suivant un protocole de prélèvement rigoureux utilisé dans le cadre de tous les autres Projets d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines au Québec. Ces résultats sont les données les plus récentes disponibles.

Les résultats d'analyses de 495 autres échantillons, issus d'études réalisées dans le passé, sont aussi disponibles et ont été traités dans le cadre du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*. Ils ne sont toutefois pas présentés dans cet atlas. Comme la qualité de l'eau peut évoluer dans le temps et que la méthode de prélèvement des échantillons passés n'est pas toujours précisée, les résultats de la campagne de l'Université Laval correspondent aux données les plus fiables.

DÉPASSEMENT DES NORMES DE POTABILITÉ

Pour déterminer la potabilité de la ressource en eau souterraine, les normes en vigueur au Québec, tel qu'établi par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40), doivent être respectées. Les normes de potabilité sont établies pour des substances pouvant avoir un impact sur la santé humaine.

Paramètres inorganiques

Aucun dépassement des normes pour les paramètres inorganiques n'a été observé parmi les 48 échantillons prélevés.

Il est toutefois établi qu'une concentration en **nitrite et nitrate** plus élevée que 3 mg/L N démontre l'influence certaine d'activités humaines,



Bouteilles utilisées lors de l'échantillonnage.

sans toutefois 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 développées peuvent être les causes de ces concentrations plus élevées de nitrite et nitrate (INSPQ, 2019). Quatre échantillons montrent des valeurs entre 3 et 10 mg/L en nitrate et nitrite. Compte tenu de l'agriculture peu intensive aux îles de la Madeleine, il est plus probable que les installations septiques soient responsables de ces concentrations. Celles-ci sont d'ailleurs beaucoup plus nombreuses sur les îles sans système d'égout (la Grosse île, île de la Grande Entrée, île d'Entrée et île aux Loups).

Paramètres microbiologiques

Des dépassements des normes pour des paramètres microbiologiques ont été observés dans 20 des 44 échantillons prélevés, ce qui représente 45 % des puits.

Plusieurs des puits échantillonnés sont non utilisés pour l'eau potable, et donc non entretenus, ce qui pourrait expliquer le nombre élevé des dépassements. Les puits non conformes sont répartis sur toutes les îles principales.

Les dépassements des normes les plus nombreux concernent les **coliformes totaux**, soit jusqu'à 30 % des échantillons. 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). Six dépassements (14 %) ont été observés.

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.

Les **bactéries entérocoques** ont été observées dans quatre puits (9 %). 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. 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 infiltrations 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 et près du tiers des installations septiques de la Communauté maritime Les-Îles-de-la-Madeleine sont jugées non conformes (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016).

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*.

La page web *La qualité de l'eau de mon puits* (MELCC, 2022b) explique les procédures à suivre pour l'entretien adéquat d'installations de production d'eau potable privée. Les propriétaires de puits domestiques sont 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).

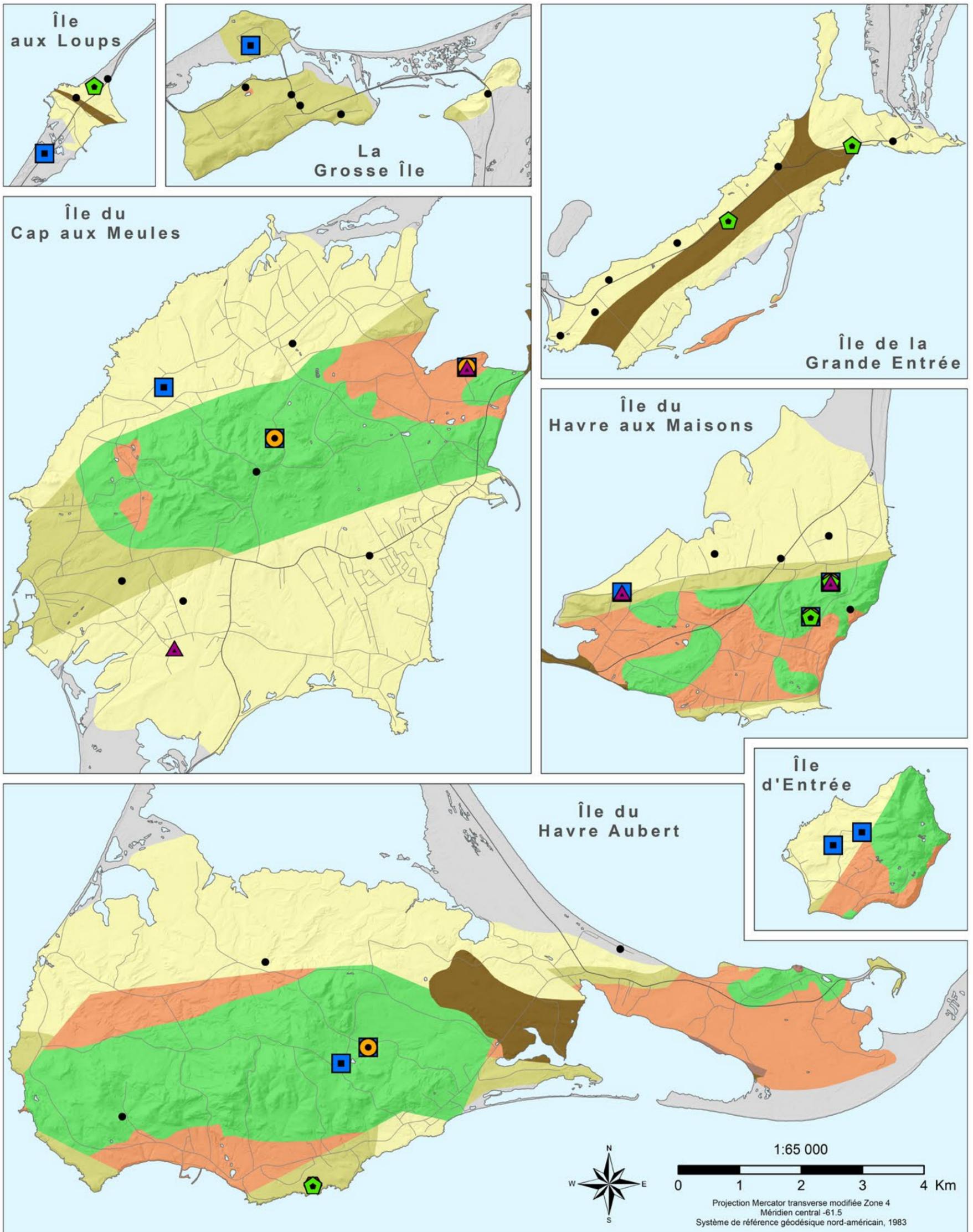
Page web *La qualité de l'eau de mon puits*: www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm

Sommaire des dépassements des normes de potabilité

Paramètres	Norme (nombre/100 ml)	Nombre échantillons	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements
Coliformes totaux	10	44	13	30 %
Bactéries atypiques	200	44	6	14 %
<i>E. Coli</i>	0	44	6	14 %
Bactéries entérocoques	0	44	4	9 %
Virus coliphages	0	44	1	2 %



Échantillonnage d'un puits à l'aide d'une pompe submersible, île du Cap aux Meules.



DÉPASSEMENTS DES NORMES DE POTABILITÉ DE L'EAU : PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES



Sources :

- Dépassements des normes de potabilité de l'eau : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

DÉPASSEMENT DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES

La qualité de l'eau potable s'évalue aussi en considérant les objectifs esthétiques recommandés par Santé Canada (2019a). Ils 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 pour le **chlorure (Cl)** et le **sodium (Na)** représentent respectivement 6 % et 2 % des échantillons prélevés. Pour un des trois puits dont l'objectif esthétique du sodium est dépassé, un dépassement en chlorure est aussi constaté (non visible sur la carte, car situé sur un cordon dunaire). 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 déglacage. Aux îles de la Madeleine, on observe ces dépassements en majorité près des côtes, ce qui laisse suggérer une intrusion d'eau salée.

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 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.

Des dépassements en **fer (Fe)** viennent affecter le goût de l'eau, et créent des tâches 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. 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).

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 maternel peuvent être particulièrement à risque. À ce jour, la réglementation du gouvernement du Québec n'inclut pas ce critère. Ainsi, 34 % des

échantillons présentent des dépassements supérieurs à 0,02 mg/L. Si on considère le seuil de 0,12 mg/L, la proportion de dépassements est de 21 %.

Des dépassements du seuil pour la santé en manganèse sont présents dans certains secteurs non desservis par les réseaux d'aqueduc municipaux, notamment sur la Grosse Île, l'île aux Loups et l'île d'Entrée. Les propriétaires des puits domestiques de ces secteurs sont donc 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.

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.

Des dépassements en **sulfate (SO₄)** ont été observés dans quatre puits résidentiels. 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. 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.

Un seul puits analysé dépasse l'objectif esthétique des **sulfures totaux (S)**, ce qui a comme conséquence d'altérer le goût et l'odeur de l'eau (Santé Canada, 2019a). Il se trouve sur un cordon dunaire (non visible sur la carte) et provient d'un puits où l'eau n'est pas consommée.

Les dépassements en **pH** sont assez nombreux (29 % des échantillons) et sont répartis un peu partout sur les îles, mais tout de même concentrés sur l'île aux Loups et sur l'île de la Grande Entrée. 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).



Échantillonnage au robinet extérieur d'une résidence.



Pompage pour l'échantillonnage dans un puits abandonné, Grosse île.

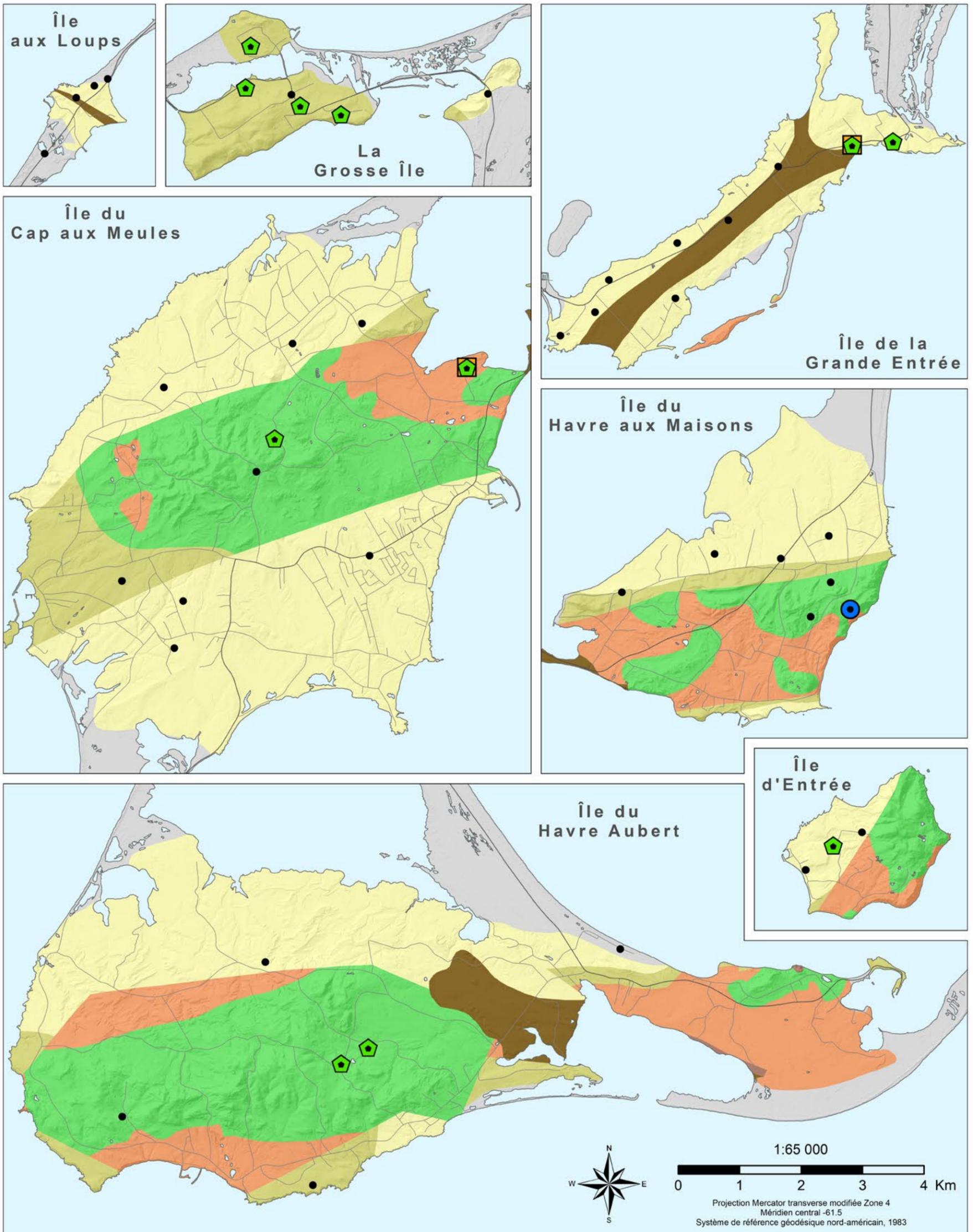
Sommaire des dépassements des objectifs esthétiques

Paramètres	Objectif esthétique ^a mg/L	Nombre échantillons	Nombre de dépassements	Proportion des dépassements
Chlorure (Cl)	250	48	3	6 %
Sodium (Na)	200	47	2	4 %
Matière dissoute totale	500	41	12	29 %
Fer (Fe)	0,3	47	8	17 %
Manganèse (Mn)	0,02	47	16	34 %
	0,12 ^b		10	21 %
Sulfate (SO ₄)	500	48	4	8 %
Sulfures (S)	0,05	47	1	2 %
pH	6,5 – 8,5 ^c	41	12	29 %

^a Objectifs esthétiques selon les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada de Santé Canada (2019a)

^b Concentration maximale acceptable pour des considérations pour la santé selon Santé Canada (2019a)

^c Selon le Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q 2, r.40)

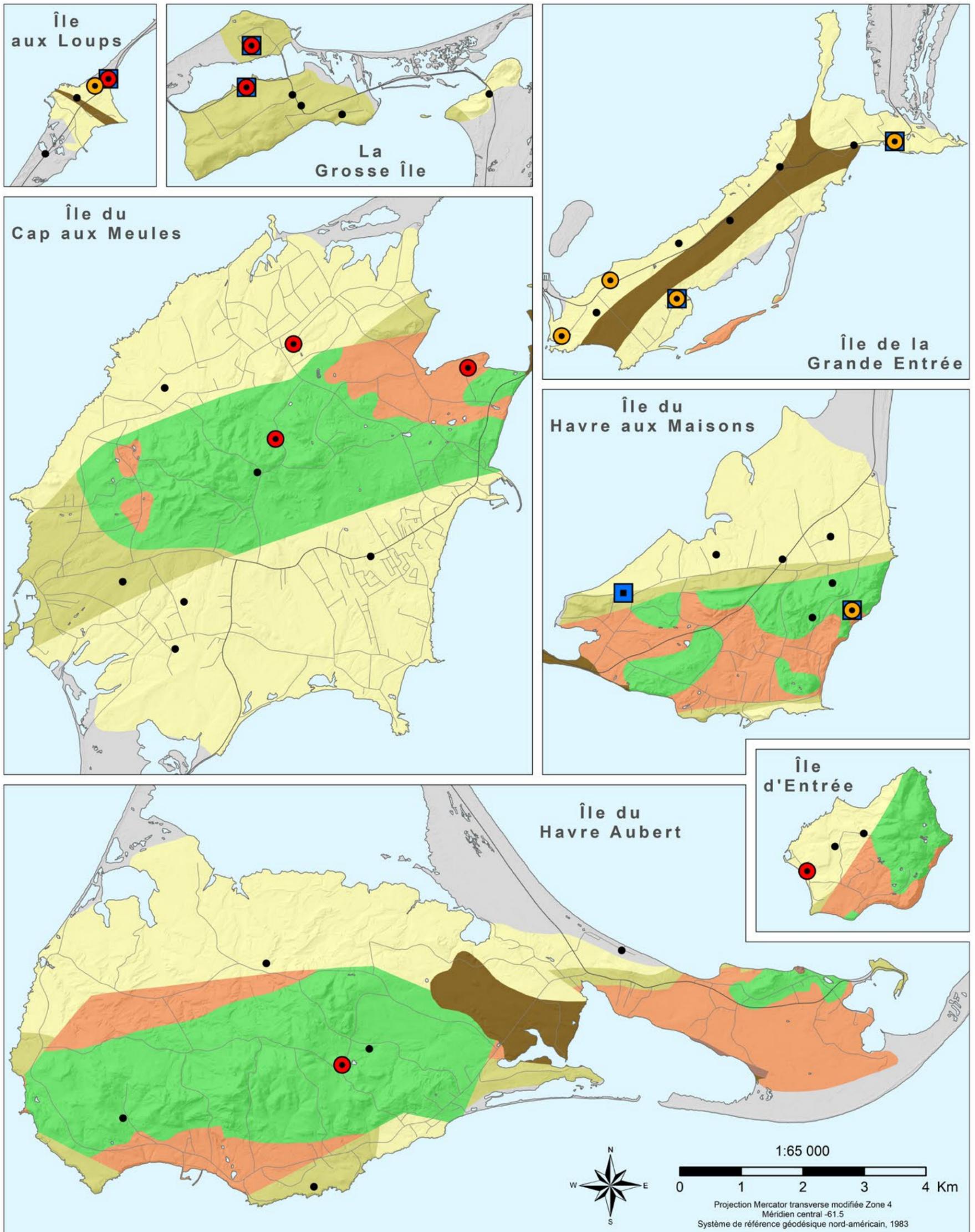


DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES DE L'EAU POTABLE : SODIUM, CHLORURE ET MATIÈRE DISSOUE TOTALE

- Échantillon conforme
- Route nationale
- Route locale
- Plan d'eau
- Échantillon non conforme
- Sodium (> 200 mg/L)
- Chlorure (> 250 mg/L)
- Matière dissoute totale (> 500 mg/L)
- Unité géologique
- Tomboles de sable
- Dépôts meubles chenalisés
- Membre de l'Étang-des-Caps
- Membre de l'Étang-du-Nord
- Dykes et stocks de gabbro
- Formation du Cap au Diable
- Formation du Havre aux Maisons

Sources :

- Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGEOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

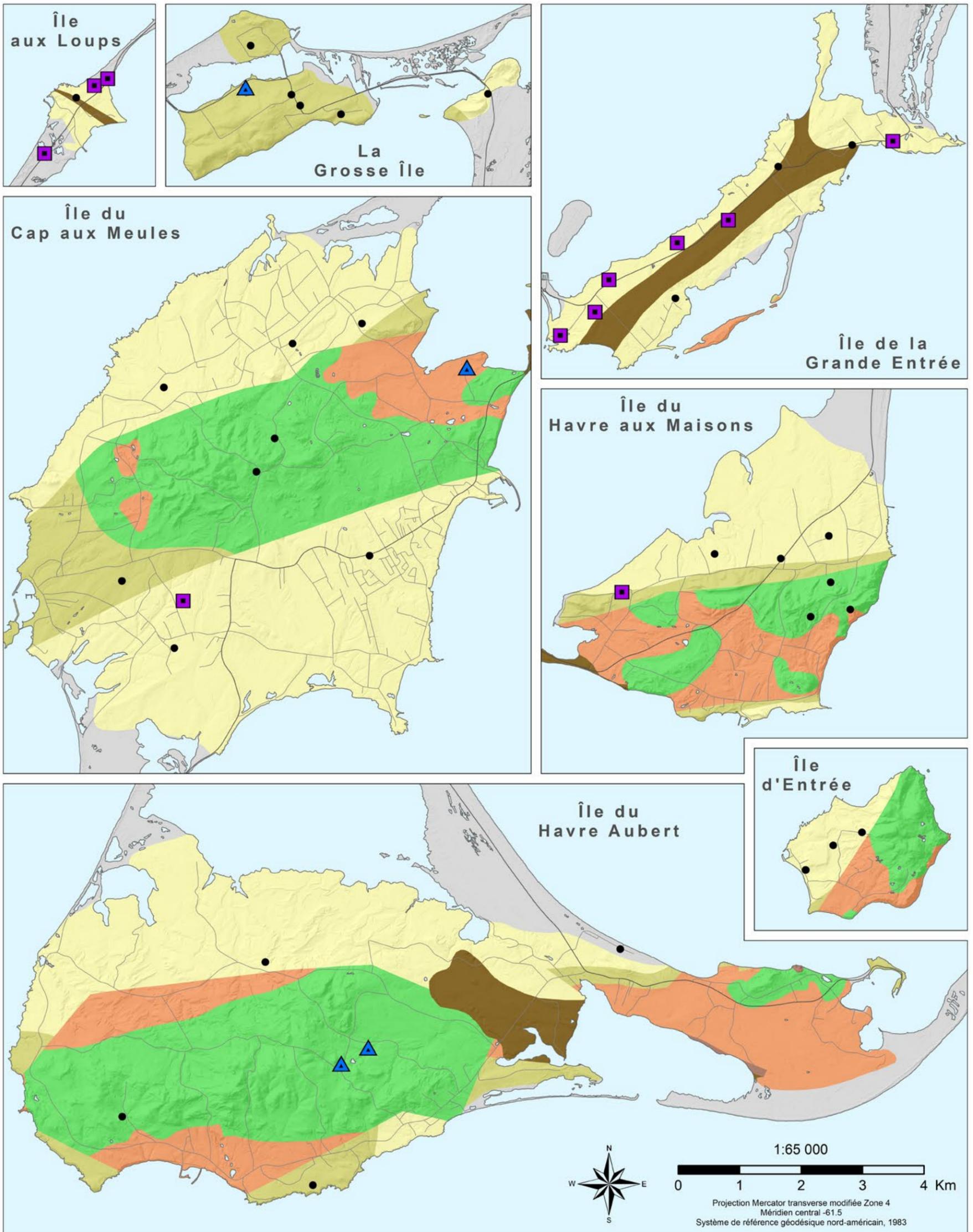


DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES DE L'EAU POTABLE : FER ET MANGANÈSE



Sources :

- Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)



DÉPASSEMENTS DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES DE L'EAU POTABLE : SULFURE, SULFATE et pH



Sources :

- Dépassements des objectifs esthétiques de l'eau potable : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Vulnérabilité de l'eau souterraine

La vulnérabilité d'un aquifère traduit la sensibilité de l'eau souterraine à la contamination provenant de la surface. La vulnérabilité des eaux souterraines des îles de la Madeleine a été évaluée à l'aide de la méthode DRASTIC (Aller et coll., 1987) qui 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 doivent être considérés. Une cote, variant entre 1 et 10, est fixée pour chaque paramètre, qui est par la suite multipliée par le poids de ce même paramètre. La somme de tous ces paramètres permet d'obtenir une valeur finale, soit l'indice DRASTIC.

Globalement, les **aquifères** des îles de la Madeleine sont vulnérables à la contamination de surface.

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;
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 plus élevée que les résultats de la méthode DRASTIC pour un contaminant libéré sous la surface du sol (ex.: oléoduc, réseau d'égout). La méthode n'est pas 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.

Les indices DRASTIC ont été calculés pour les îles principales sur une grille régulière de 20 m par 20 m. Ils varient de 87 à 184, avec une moyenne de

142. Des indices de plus de 140 sont obtenus pour plus de la moitié du territoire. 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, 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.

Inversement, les aquifères des buttes centrales sont les moins vulnérables, avec une moyenne de leurs indices DRASTIC de 121. 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.

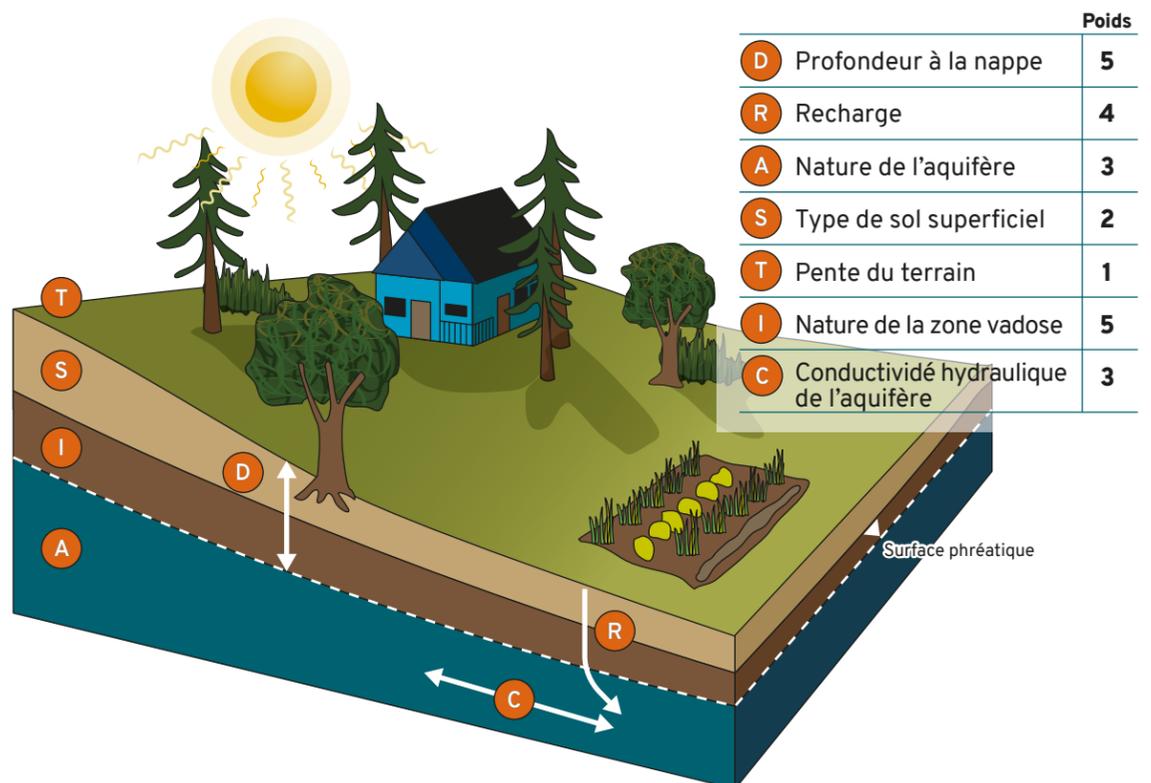
Sur les plateaux de grès, la vulnérabilité est assez variable, mais demeure en moyenne relativement élevée avec un indice moyen

de 147. 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.

Résultats obtenus pour les indices DRASTIC aux îles de la Madeleine

Contexte géomorphologique	Indice DRASTIC		
	Min	Max	Moyenne
Buttes centrales	87	157	121
Plateaux de grès	95	176	147
Dunes de sable	131	184	177
Îles de la Madeleine	87	184	142

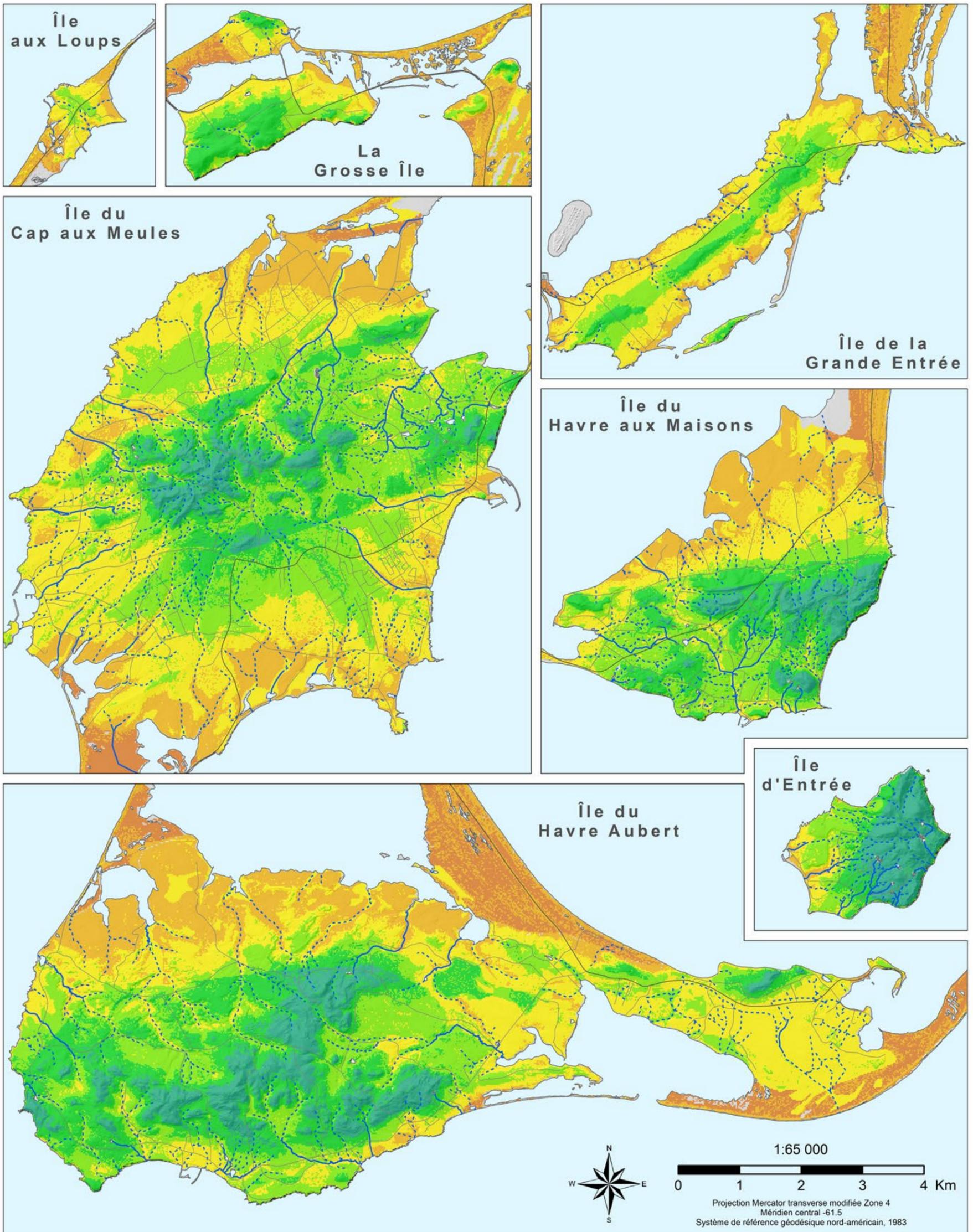
Zone vadose: zone comprise entre la surface du sol et la nappe, dans laquelle les pores contiennent de l'eau et de l'air mais ne sont pas entièrement saturés d'eau (aussi appelé **zone non saturée**)



Schématisme de la méthode DRASTIC, basée sur sept paramètres hydrogéologiques et géologiques, et leur poids respectif dans le calcul de l'indice.

Description des paramètres hydrogéologiques et géologiques de la méthode DRASTIC

Paramètre (unités)	Description
D Profondeur à la nappe phréatique (m)	Moins la nappe est profonde, plus un contaminant peut l'atteindre rapidement, plus son potentiel d'atténuation est faible, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
R Recharge (mm/an)	Plus le taux de recharge est élevé, plus la quantité d'eau pouvant mobiliser et transporter un contaminant vers la nappe est grande, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
A Nature du milieu aquifère	Plus les matériaux composant l'aquifère sont perméables, plus le potentiel d'atténuation d'un contaminant dans l'aquifère est faible, plus il peut circuler facilement et atteindre d'autres portions de l'aquifère, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
S Type de sol en surface	Plus la couche de sol pédologique en surface est perméable, plus la capacité d'infiltration d'un contaminant mobilisé par l'eau est grande, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
T Pente du terrain (%)	Plus la surface du sol est plane, moins un contaminant peut être mobilisé par l'eau de ruissellement, plus il a de chance de s'infiltrer dans le sol, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
I Nature de la zone vadose	Plus les matériaux composant la zone vadose (ou non saturée) sont perméables, plus la capacité de percolation jusqu'à la nappe d'un contaminant mobilisé par l'eau est élevée, plus son potentiel d'atténuation dans la zone vadose est faible, et plus l'eau souterraine est vulnérable.
C Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/jour)	Plus la conductivité hydraulique de l'aquifère est élevée, plus un contaminant mobilisé par l'eau peut circuler facilement dans l'aquifère, et plus l'eau souterraine est vulnérable.



VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES SELON LA MÉTHODE DRASTIC



Sources :

- Estimation de l'indice DRASTIC : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Coupes hydrogéologiques

Des coupes présentant le contexte hydrogéologique propre à chacune des îles principales ont été réalisées. 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). L'élévation de la surface libre de la nappe et l'épaisseur de la lentille d'eau douce, déduite de la profondeur de l'interface, 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 identiques à celles des coupes géologiques montrées à la section *Contexte géologique*.

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. 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, 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.

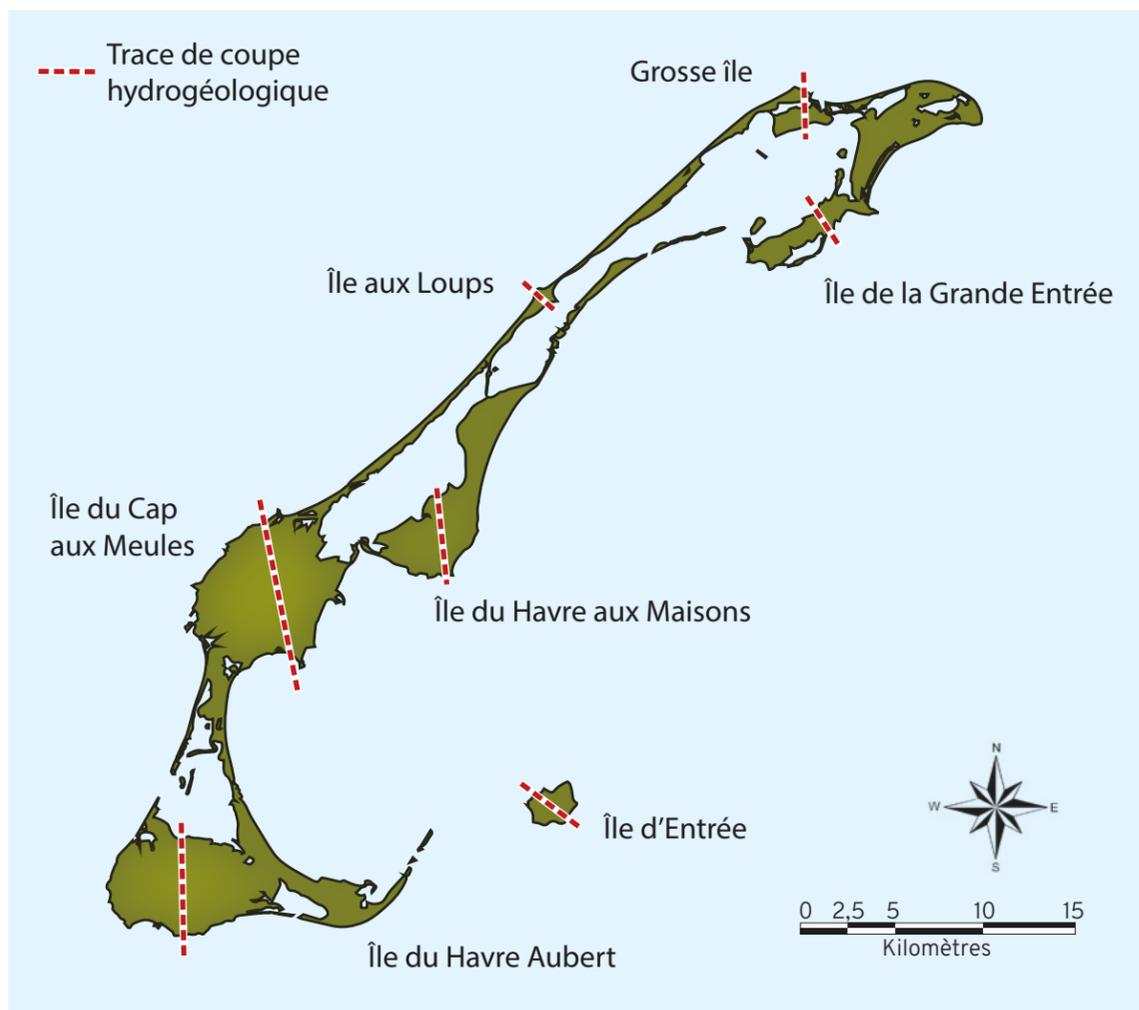
Pour les **îles du Havre Aubert et du Havre aux Maisons**, il est à noter que la lentille d'eau douce située sur le flanc sud est très étroite par rapport à celle du flanc nord, puisqu'on y retrouve une bande beaucoup plus mince du plateau de grès composé des membres de l'Étang-des-Caps et de l'Étang-du-Nord.

Pour **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.

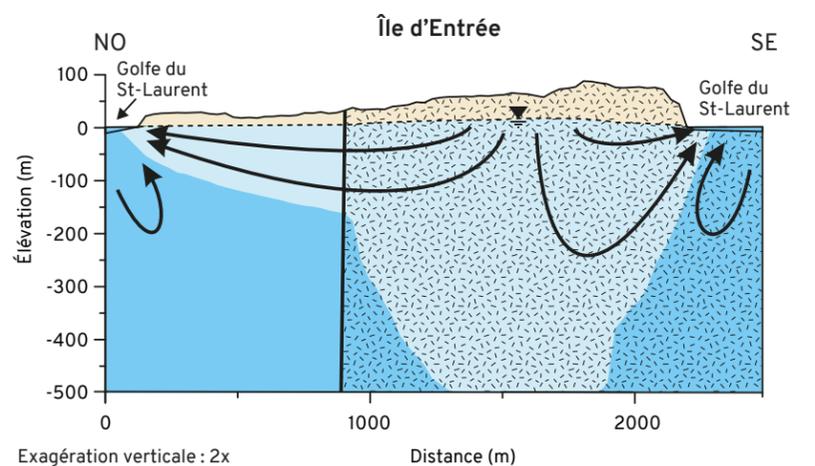
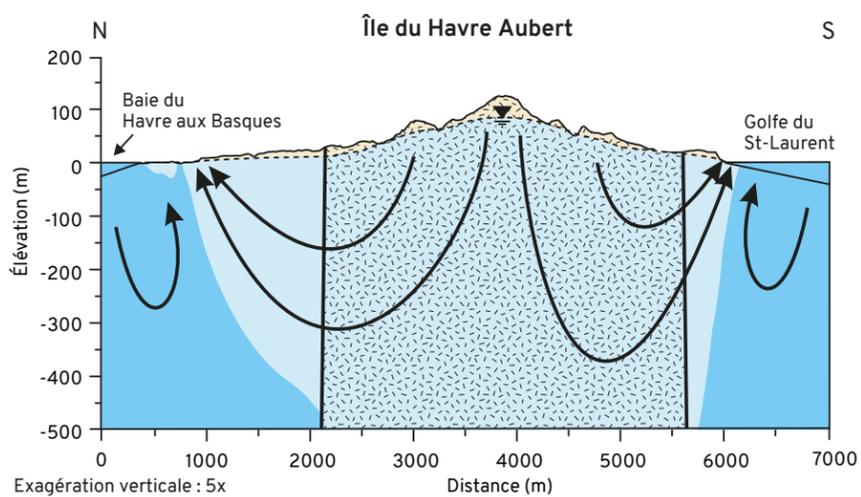
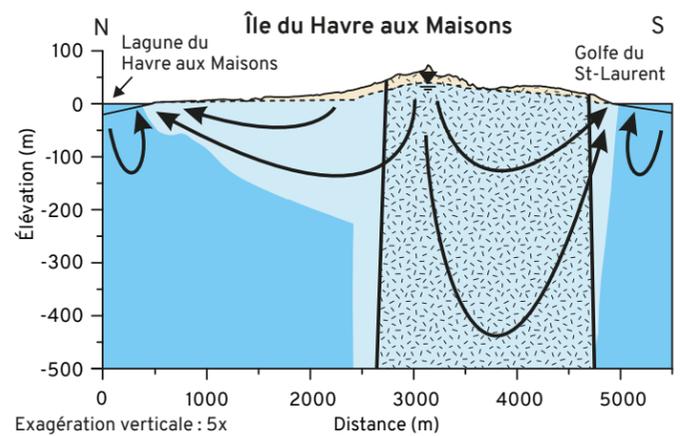
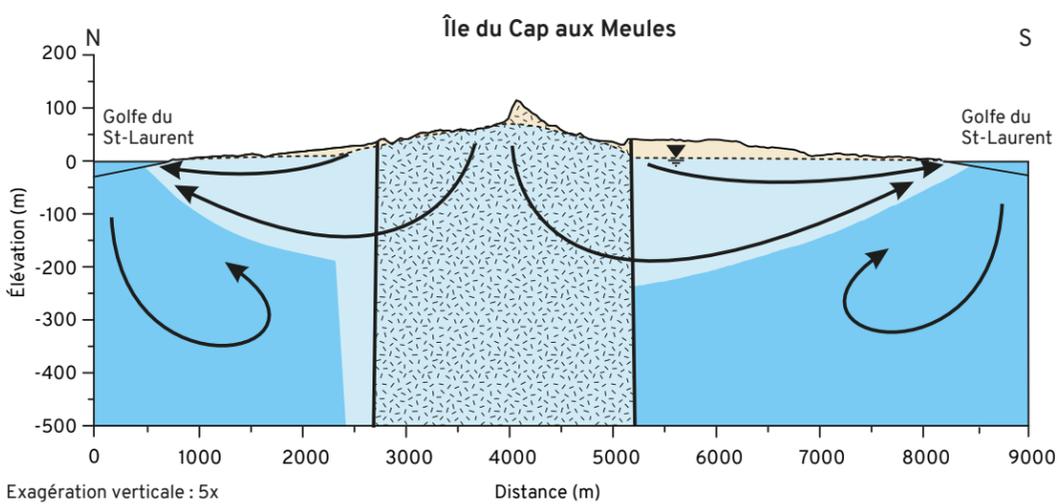
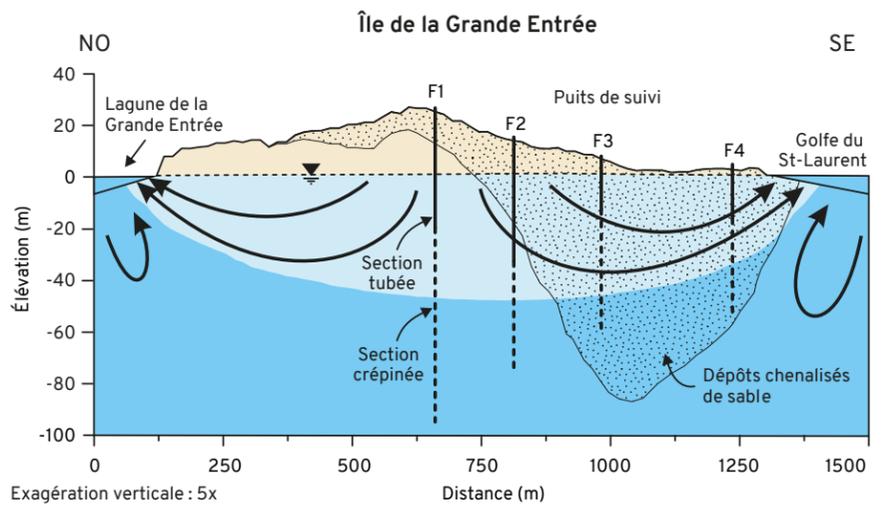
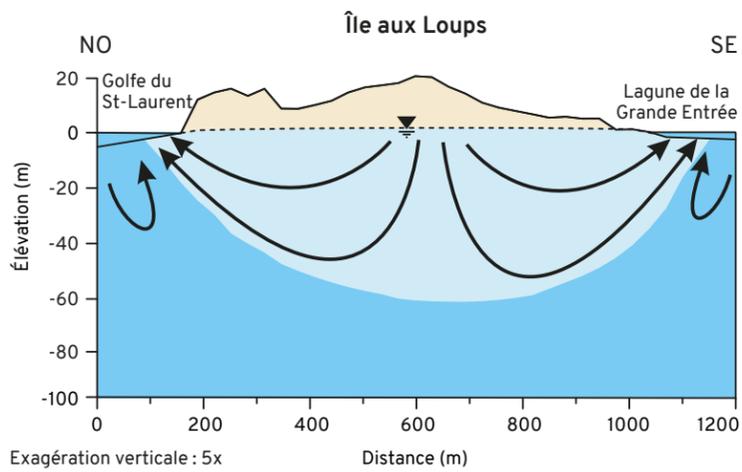
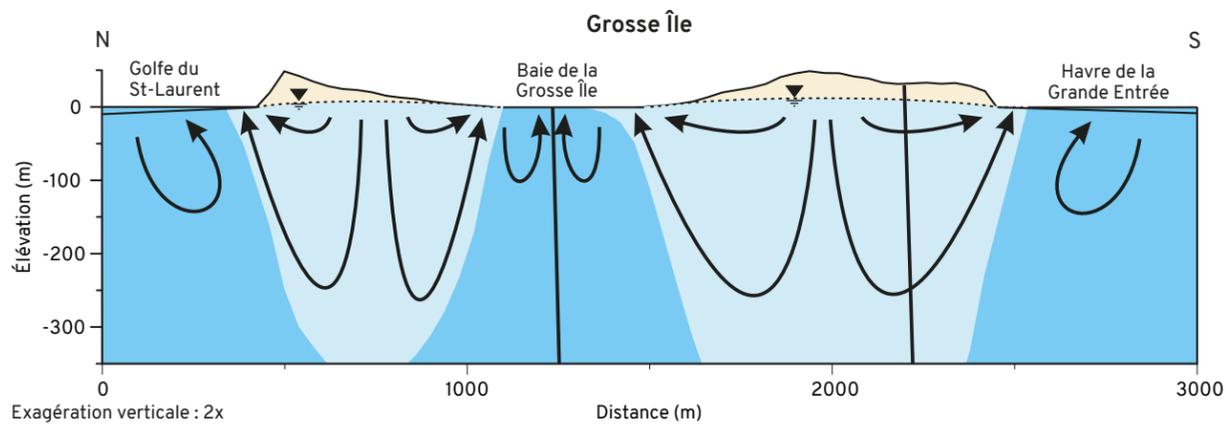
Enfin, pour l'**île de la Grande Entrée**, le contenu de la coupe diffère légèrement des autres. En effet, les dépôts chenalisés de sable y sont représentés, atteignant une épaisseur supérieure à 80 m. Les puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, montrés à la section *Suivis piézométriques*, sont également représentés sur la coupe, 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.



Localisation des coupes hydrogéologiques. Les traces des coupes sont identiques à celles des coupes géologiques et sont montrées sur la carte *Géologie du socle rocheux* à la section *Contexte géologique*.



Secteur de La Grave, île du Havre Aubert.



Légende

- | | | | |
|--|---|--|----------------------------------|
| | Aquifère au potentiel d'exploitation faible | | Surface libre de la nappe |
| | Aquifère au potentiel d'exploitation moyen | | Direction d'écoulement régionale |
| | Aquifère au potentiel d'exploitation élevé à très élevé | | Faïlle |
| | Eau douce | | |
| | Eau salée | | |

Coupes hydrogéologiques. Les traces des coupes sont identiques à celles des coupes géologiques montrées sur la carte *Géologie du socle rocheux* à la section *Contexte géologique*.

Gestion durable des ressources

en eau souterraine

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 et des ressources en eau souterraine 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 Pression sur l'eau souterraine). Ces préoccupations peuvent être abordées par l'évaluation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits municipaux, de même que par la quantification des ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place. L'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau souterraine constitue la troisième préoccupation prioritaire. Il pourrait être évalué dans les parties du territoire d'où s'infiltrerait l'eau des précipitations pour recharger les nappes exploitées ou qui pourraient servir pour les générations futures. Ces secteurs correspondent aux aires d'alimentation des aquifères exploitables à cartographier.

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, amplifiant ainsi le phénomène de la remontée de l'interface et le risque de contamination du puits par de l'eau salée.

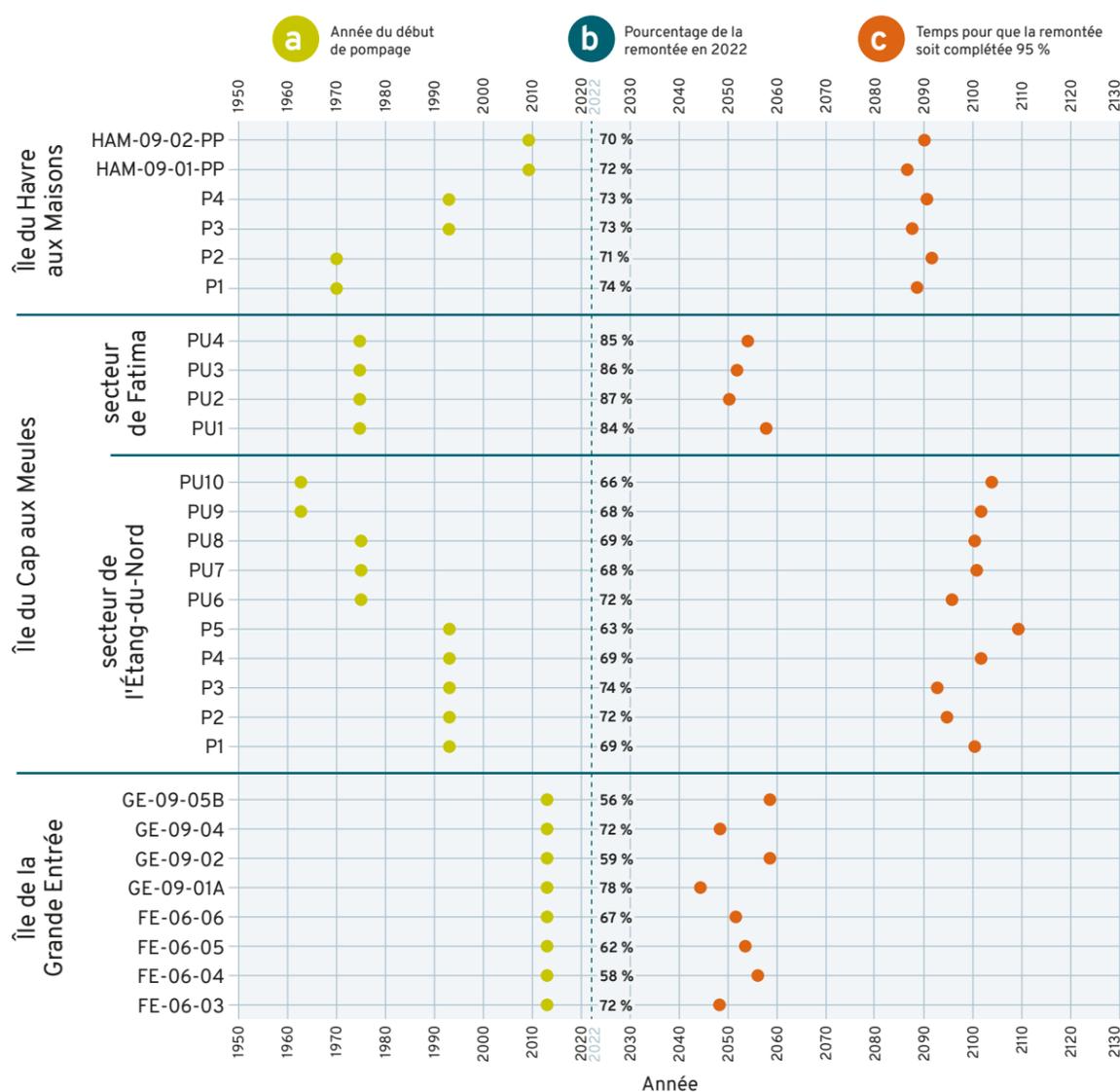
Une estimation de la remontée de l'interface eau douce – eau salée a été réalisée, à l'aide des modèles hydrogéologiques numériques, sous les puits municipaux de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Cette évaluation vise à savoir si la position de l'interface a atteint un état d'équilibre depuis la mise en service des puits, 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.

Aucun des puits n'a atteint un niveau d'équilibre à l'heure actuelle. 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 avant le début du pompage se situe sous la base du modèle à 500 m sous le niveau de la mer. Les remontées devraient atteindre 95 % entre 2045 et 2110 selon les puits, potentiellement beaucoup plus à l'île du Havre Aubert.

La dynamique de la remontée de l'interface sous les puits est rapide durant les premières années suite à la mise en service d'un puits, et ralentit ensuite au fil du temps en s'approchant du niveau d'équilibre. Il est complexe 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.



Havre de pêche de l'Étang-du-Nord, île du Cap aux Meules.



Remontée de l'interface eau douce – eau salée sous les puits de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. a) Année du début du pompage. b) Pourcentage de la remontée en 2022. c) Temps pour que la remontée soit complétée à 95 %. Pour certains puits, le niveau initial de l'interface était inconnu, car il était plus profond que la base du modèle et il n'a donc pas été possible d'évaluer l'état de la remontée en termes de pourcentage. C'est notamment le cas pour plusieurs puits de l'île du Cap aux Meules et tous ceux de l'île du Havre Aubert. Les puits sont localisés à la carte Systèmes municipaux de distribution en eau potable de la section *Exploitation des eaux souterraines*.

Quantification des ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux en place

Les ressources exploitables avec les réseaux de puits municipaux ont été quantifiées, en considérant la demande future en eau ainsi que l'effet des changements climatiques. 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.

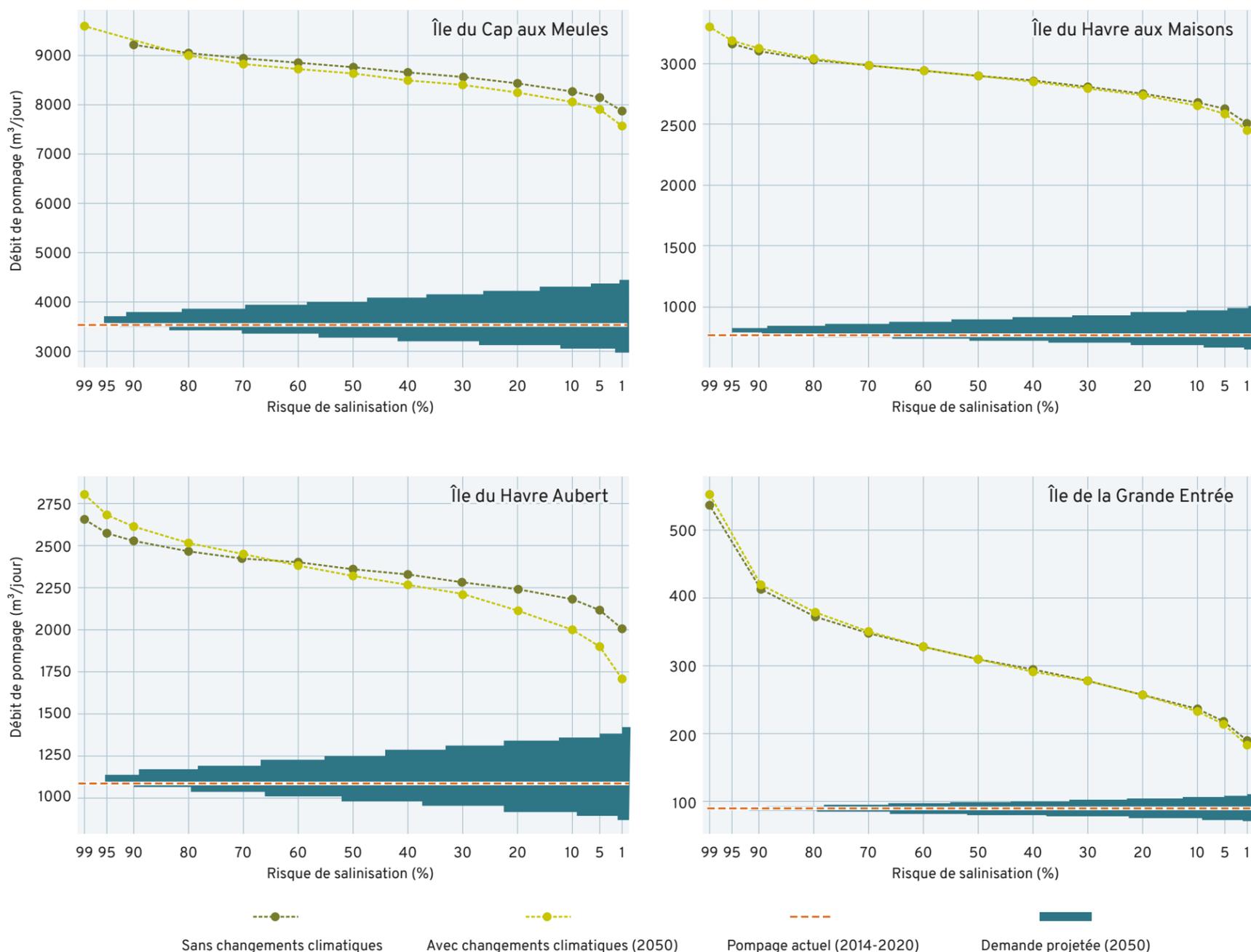
Pour chaque puits, plusieurs valeurs optimales de débit de pompage ont été simulées, chacune étant associée à un risque de salinisation différent, variant de 1 à 99 %. Les résultats sont présentés sous la forme d'une courbe pour laquelle les risques de salinisation sont plus élevés pour des débits élevés, 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.

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 et aux projections de la consommation d'eau en 2050 établies à la section *Usage de la ressource*.

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.



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 municipaux des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert, du Havre aux Maisons et de la Grande Entrée.

Délimitation des aires d'alimentation des aquifères exploitables

La délimitation des aires d'alimentation des aquifères exploitables est utile afin de connaître les secteurs où devraient porter les efforts de protection et de gestion des ressources en eau souterraine. Dans ces aires d'alimentation, toute contamination pourrait affecter la qualité de l'eau des aquifères actuellement exploités, ou qui pourraient servir pour les générations futures.

Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'approvisionnement en eau potable des îles de la Madeleine, 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, comme 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. L'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau souterraine, 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 *Pressions sur l'eau souterraine*), pourrait être évalué dans ces secteurs qui sont de surcroît vulnérables à la contamination.

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. 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.

Les modèles hydrogéologiques ont été utilisés pour tracer les lignes d'écoulement, et ainsi délimiter, pour chacune des îles de l'archipel, l'ensemble des territoires où l'eau souterraine circule à travers un aquifère à potentiel d'exploitation moyen à très élevé.

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 l'**île 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 %.

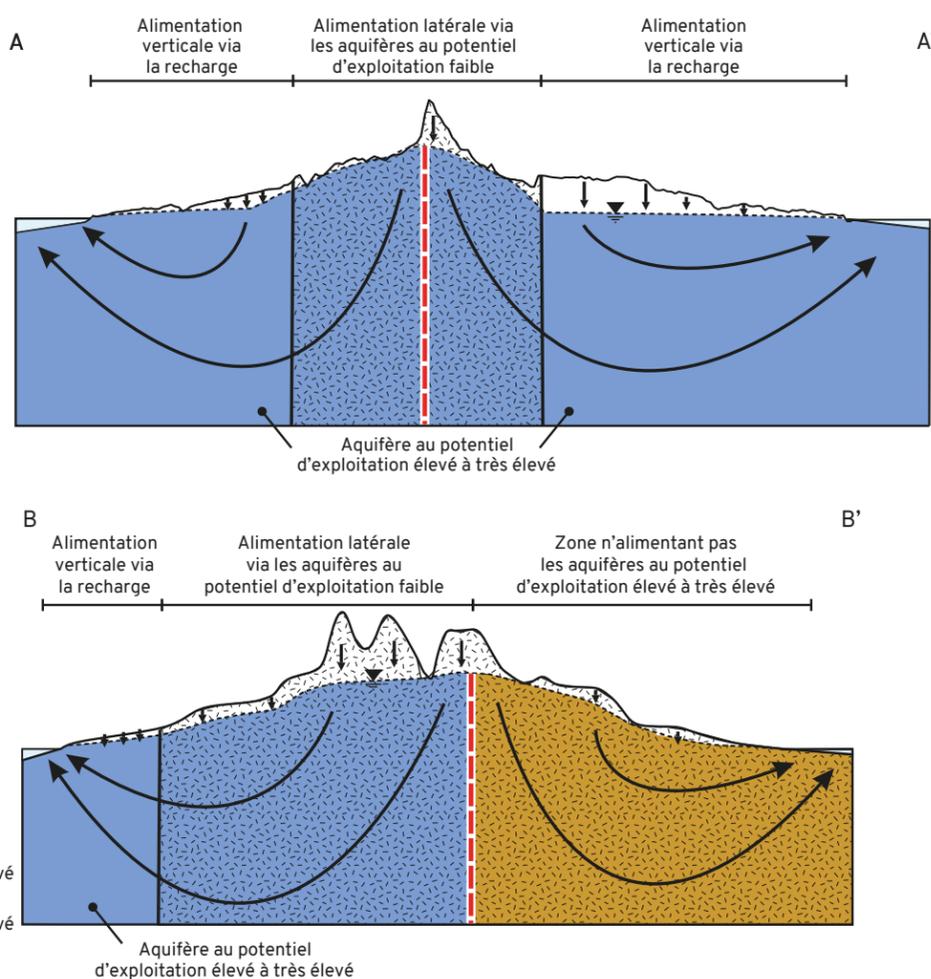
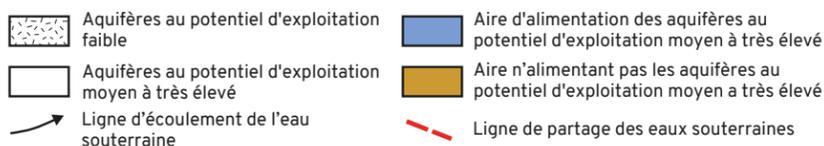
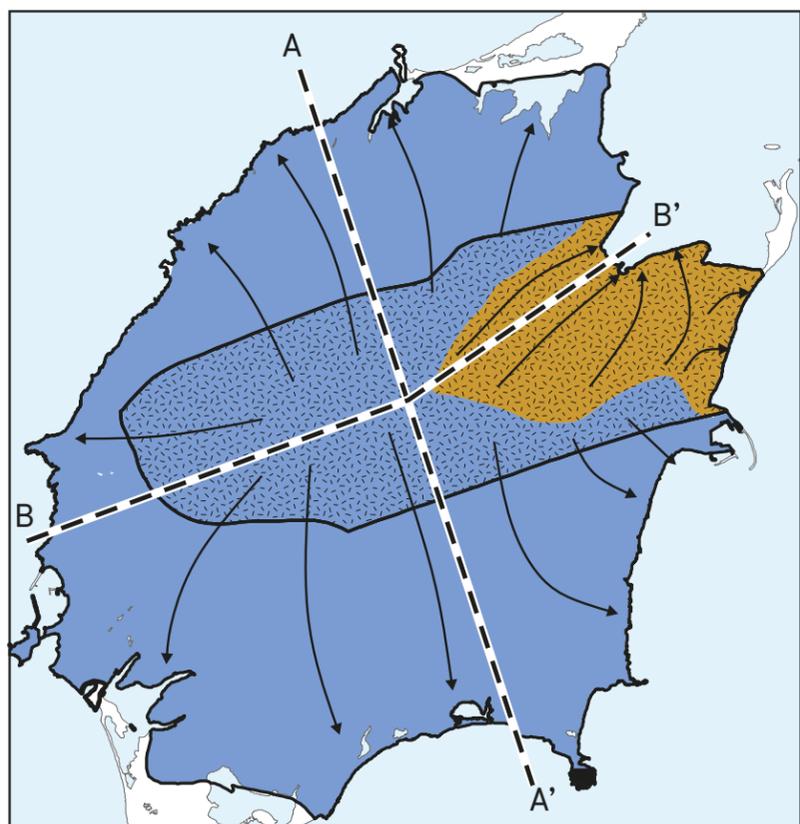
Bien que tout le territoire qui recouvre les aquifères d'eau douce au potentiel d'exploitation moyen à très élevé de l'archipel puisse être utilisé pour l'exploitation des eaux souterraines, cela n'est pas possible d'un point de vue pratique pour un usage municipal.

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.

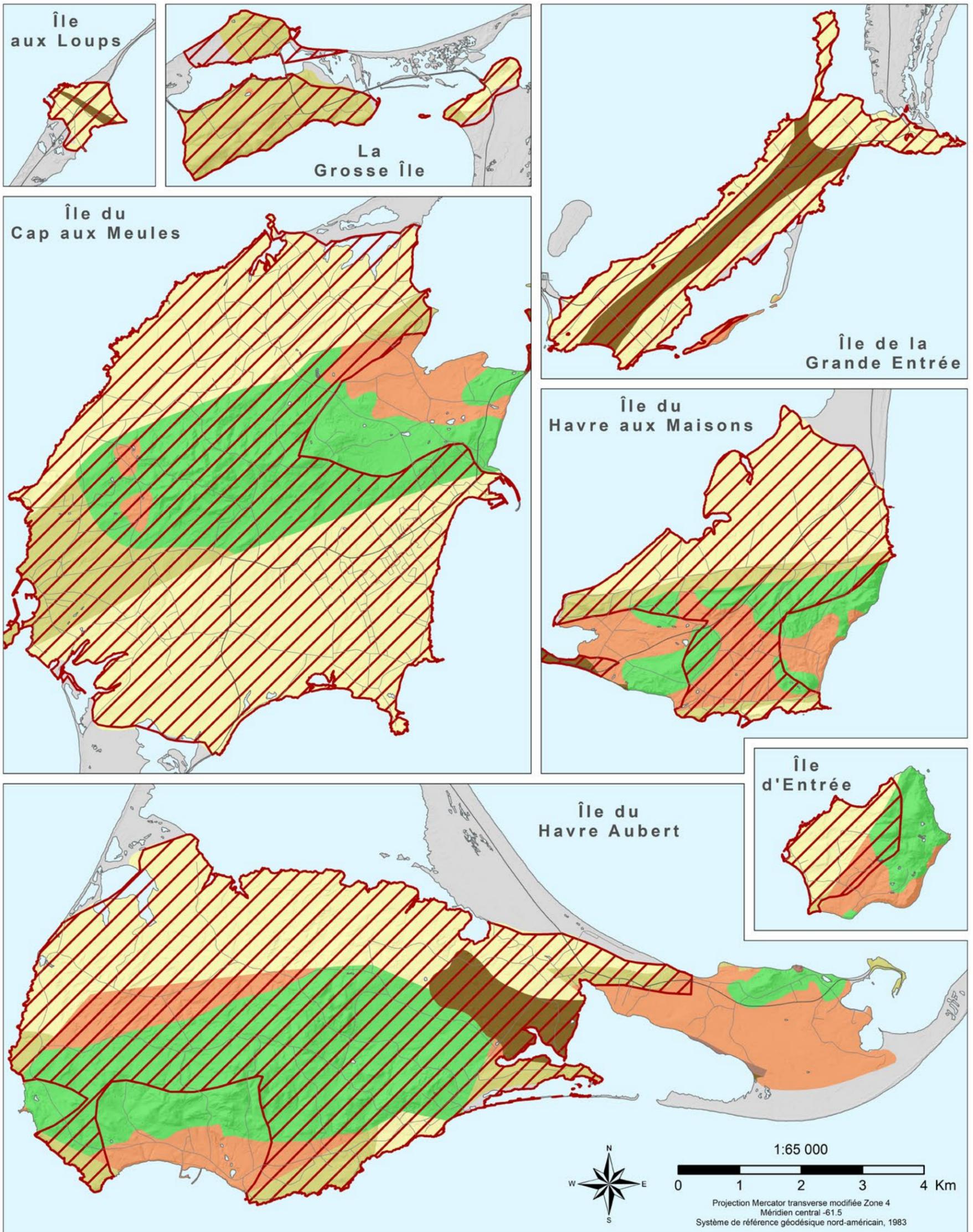
Les zones où la lentille d'eau douce est mince se retrouvent généralement en périphérie des îles, à proximité de la mer. Dans ces secteurs, l'eau souterraine est sur le point de faire résurgence

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 présentées. 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.

Étant donné que l'eau souterraine représente l'unique source d'approvisionnement en eau potable des îles de la Madeleine, 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



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 côté 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'exploitation moyen à très élevé situés sur leur gauche, en aval hydraulique.



AIRES D'ALIMENTATION DES AQUIFÈRES EXPLOITABLES

- Aire d'alimentation d'un aquifère au potentiel d'exploitation moyen, élevé ou très élevé
- Route nationale
- Route locale
- Plan d'eau

Unité géologique

- | | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Tombolos de sable | Membre de l'Étang-des-Caps | Dykes et stocks de gabbro | Formation du Havre aux Maisons |
| Dépôts meubles chenalisés | Membre de l'Étang-du-Nord | Formation du Cap au Diable | |

Sources :

- Aires d'alimentation des aquifères exploitables : Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine, Université Laval (2022)
- Géologie du roc : Brisebois, D. (1981). Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Îles de la Madeleine. SIGÉOM, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Route : Adresse Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2021)
- Réseau hydrographique : Géobase du réseau hydrographique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)
- Relief ombré : Produits dérivés des levés laser aéroporté (LiDAR), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2018)

Conclusion

Cet atlas constitue une synthèse du *Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine*, réalisé par une équipe de recherche de l'Université Laval (Lemieux et coll., 2022), en collaboration avec la Communauté maritime Les Îles-de-la-Madeleine. Ce projet a permis de rassembler et compiler les connaissances existantes sur les eaux souterraines de la région, de réaliser des travaux de terrain complémentaires et de produire des interprétations hydrogéologiques, le tout permettant d'obtenir un portrait complet et accessible. Une des particularités de ce portrait est que plusieurs analyses hydrogéologiques ont été produites à l'aide de modèles numériques, permettant 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 utiles à la gestion durable de la ressource, en considérant les conditions attendues dans le futur, découlent directement des modèles d'écoulement souterrain construits pour chaque île.

DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

L'eau souterraine représente l'unique source d'alimentation en eau potable de l'archipel. Les aquifères principaux de grès 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. Elle est toutefois vulnérable à la contamination et le territoire possède de nombreuses activités humaines susceptibles de l'affecter. 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.

Il a été évalué que la quantité d'eau prélevée annuellement par les puits municipaux correspond à près de 5 % de la recharge totale annuelle des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé, et à moins de 0,1 % du volume d'eau douce souterraine disponible dans ces aquifères. Ces résultats démontrent que les prélèvements sont faibles par rapport aux ressources disponibles et à leur réalimentation. Les taux de prélèvement semblent aussi 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 et diminution médiane de 2 % de la recharge due aux changements climatiques).

Ces constats suggèrent que l'eau souterraine douce est disponible en quantité largement suffisante pour subvenir aux besoins des habitants des îles de la Madeleine. Même, une quantité additionnelle d'eau souterraine pourrait être exploitée durablement. La problématique principale liée à son exploitation réside plutôt dans les limites imposées par le risque de salinisation des puits. En règle générale, dans un contexte hydrogéologique comme celui des îles de la Madeleine, il est préférable 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.

CONDITIONS D'EXPLOITATION DES RÉSEAUX DE PUIITS 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. Même si aucun des puits actuels n'est présentement affecté par une intrusion d'eau salée, il n'est pas exclu que cela se produise dans le futur. D'ailleurs, certains puits

ont un débit de pompage qui pourrait causer leur salinisation à moyen terme. Ces puits devraient donc faire l'objet d'un suivi, ce qui pourrait mener à la diminution de leur débit de pompage. 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 causer une intrusion d'eau salée. Ils devraient eux aussi bénéficier d'un suivi attentif et leur débit ne devrait pas être augmenté.

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 a été 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.

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 du Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine 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.

QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

Les analyses sur la potabilité de l'eau ont révélé qu'une proportion relativement importante des échantillons d'eau de puits de particuliers ne respectaient pas les normes établies pour protéger la santé des consommateurs pour les paramètres microbiologiques. 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.

Ainsi, outre ces dépassements, aucun autre dépassement n'a été observé pour les normes de potabilité. Les recommandations pour le manganèse sont par contre parfois non respectées. L'eau souterraine présente aux îles de la Madeleine est globalement considérée comme de très bonne qualité et peut souvent être distribuée sans traitement particulier.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Des températures plus élevées auraient pour effet de favoriser l'évapotranspiration, diminuant ainsi la recharge estivale. Ce phénomène serait contrebalancé par des hivers plus doux et des chutes de pluie plus abondantes, favorisant la recharge hivernale. Une légère diminution nette de la recharge est tout de même attendue, provoquant une baisse de la nappe, et par conséquent, une remontée de l'interface eau douce – eau salée.

La hausse du niveau marin relatif, due à une combinaison de la remontée de la mer et à la subsidence des îles, aura pour effet l'immersion de terres et la perte de la superficie des îles, diminuant ainsi les réserves d'eau douce.

L'érosion et le recul des côtes auraient un impact mineur sur la position de l'interface eau douce – eau salée, et à part pour les secteurs très près de la mer, n'apparaissent pas comme une problématique majeure pour la disponibilité de l'eau souterraine.

En combinant les impacts d'une recharge diminuée, d'une remontée relative du niveau marin et de l'érosion côtière, il a été déterminé que les puits municipaux des îles du Cap aux Meules, du Havre Aubert et du Havre aux Maisons sont peu vulnérables face aux changements climatiques. 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.

PLAN DE PROTECTION ET DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

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 et les nombreuses pressions exercées par les activités humaines, 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 ont été cartographiées et correspondent aux aires d'alimentation des aquifères au potentiel d'exploitation moyen à très élevé. 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. Un plan de protection de la ressource, établissant des objectifs ciblés et coordonnés avec les différents acteurs du territoire, devrait être mis en œuvre à l'aide de mesures appropriées à chacun des buts visés, et en assurant un suivi périodique pour en évaluer l'efficacité.

TRANSFERT DES 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 Réseau québécois sur les eaux souterraines, pour faciliter la prise en compte des connaissances sur l'eau souterraine dans les décisions de gestion et de l'aménagement du territoire.

Des ateliers de transfert de connaissances ont été réalisés dans cette optique. Ces ateliers ne sont 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.



Phare du Borgot, île du Cap aux Meules

Liste de références

- 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/wplD3175atID5999.pdf> (page consultée le 26 janvier 2022).
- 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.
- 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%AEles-de-la-madeleine/index.htm (page consultée le 8 décembre 2021).
- Bourque, P.-A. (2010). *Planète Terre*. [En ligne]. http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html (page consultée le 1 février 2022).
- 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.
- 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.
- Cohen A.J.B. et Cherry J.A. (2020) *Conceptual and visual understanding of hydraulic head and groundwater flow*, The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 58 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).
- Hétu, 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.431451.
- 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 (2021). *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).
- 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., 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, mars 2022, 293 p. et annexes.
- 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).
- MELCC (2021). *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 (page consultée le 7 octobre 2021).
- 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).
- 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., Hétu, 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.
- Mercier-Rémillard, A., St-Onge, G., Bernatchez, P., Hétu, 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.
- 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 (page consultée le 1er 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.
- 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.
- 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/qualiteau/recommandations-qualiteau-potablecanada-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).
- Shaw, J., Gareau, P. et Courtney, R. C. (2002). *Palaeogeography of Atlantic Canada 13-0 kyr*. Quaternary Science Reviews, 21, pp. 1861-1878.
- Tardif, L. (1967). *Pédologie des Îles-de-la-Madeleine*. Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Gouvernement du Québec, 46 p. et annexes.
- Tourisme Îles de la Madeleine (2019). *Rapport annuel de Tourisme des Îles de la Madeleine 2018-2019*. 44 p.
- 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.



Les eaux souterraines aux îles de la Madeleine, une ressource unique

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, économique qu'environnemental. Or, l'archipel est vulnérable à l'intrusion d'eau salée dans l'aquifère régional de grès rouge, le réservoir d'eau douce exploitable de l'archipel. Les changements climatiques pourraient exacerber ce risque et contribuer à réduire la disponibilité de la ressource. De surcroît, les aquifères de grès sont en contact direct avec la surface, ce qui accentue la vulnérabilité de l'eau souterraine, généralement de grande qualité naturelle, à se voir affecter par un contaminant qui proviendrait d'une des nombreuses activités humaines pratiquées sur le territoire.

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 (depuis la 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 basées sur une connaissance approfondie sur les eaux souterraines et les aquifères qui les contiennent.

Le **Portrait des ressources en eau souterraine des îles de la Madeleine** a ainsi été dressé dans le but de protéger la ressource 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 peut-on 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 de l'archipel ?

LES AUTEURS:

Jean-Michel Lemieux, ing., Ph. D. en Sciences de la Terre, professeur titulaire

Alexandra Germain, ing., M. Sc. en Sciences de la Terre, professionnelle de recherche

Yohann Tremblay, M. Sc. en Sciences de l'eau, professionnel de recherche

Laura Gatel, Ph. D. en Sciences de la Terre, professionnelle de recherche

Guillaume Arbour, M. Sc. en Sciences de l'eau, professionnel de recherche

Cécile Coulon, M. Sc., Sciences de la Terre, étudiante au doctorat en Sciences de la Terre

Christian J. Dupuis, Ph. D. en Géologie, professeur titulaire

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

www.ggl.ulaval.ca