

Évaluation du potentiel géothermique des Îles-de-la-Madeleine: propriétés thermiques et hydrauliques des unités géologiques

Hubert Langevin
Félix-Antoine Comeau
Jasmin Raymond
Michel Malo

Document scientifique et technique I-404

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
À RESEARCH UNIVERSITY



La géothermie aux Îles-de-la-Madeleine

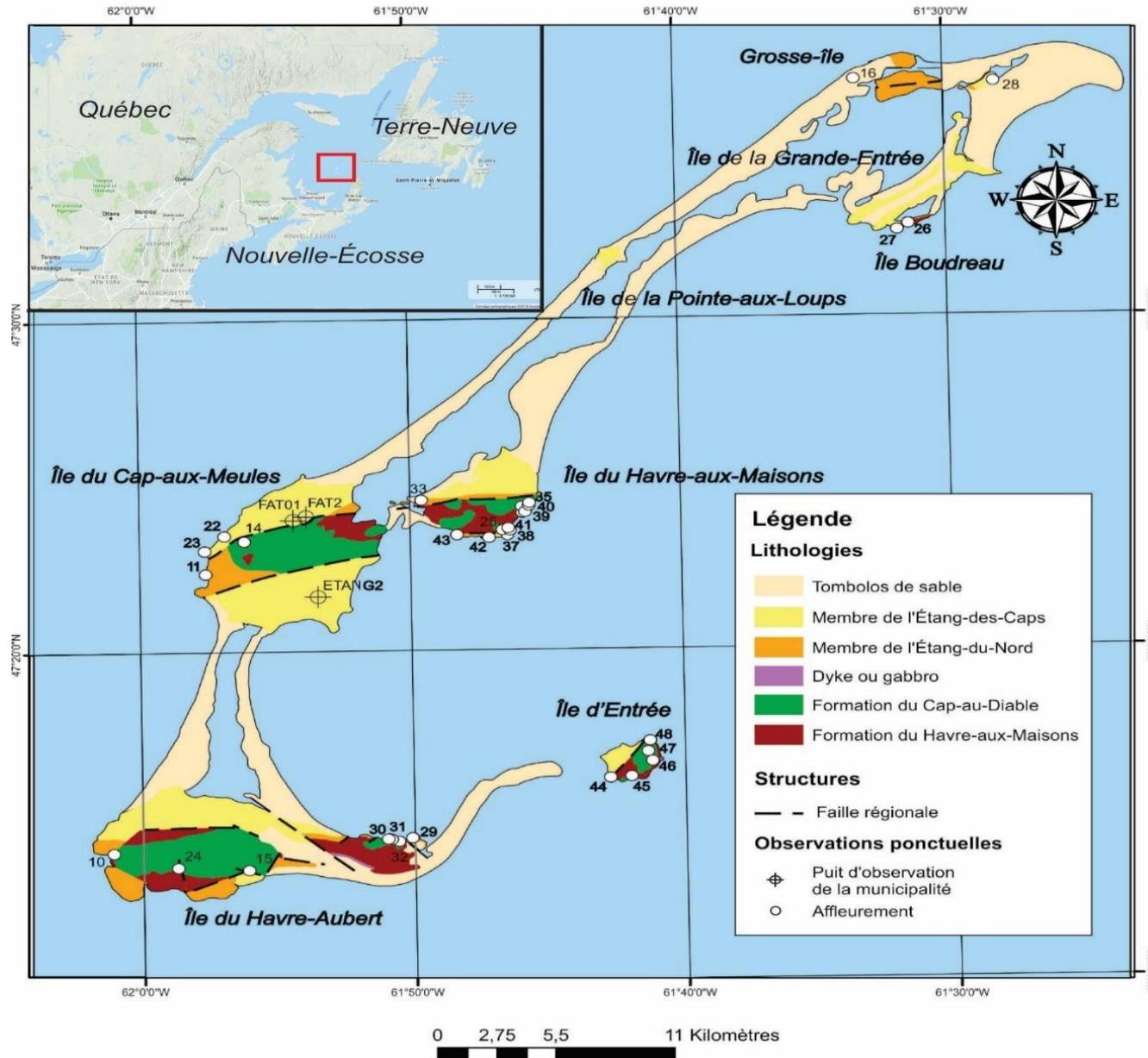
Située au cœur du Golfe du Saint-Laurent, la municipalité des Îles-de-la-Madeleine est répartie sur une superficie d'environ 200 km². En 2011, la municipalité comptait déjà 12 781 habitants, un nombre qui est beaucoup plus important en été lors de la période touristique.

En raison de son isolement du réseau de distribution de l'hydro-électricité de la société d'état Hydro-Québec, cet archipel produit de l'électricité à l'aide d'une centrale thermique consommant des hydrocarbures. Ainsi, cette production d'électricité compte pour environ 37 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) reliés à la production d'énergie du réseau d'Hydro-Québec. De plus, la majorité des bâtiments et résidences sont chauffées par des systèmes consommant du mazout. Il est donc impératif de réduire les émissions de GES de cette municipalité et de trouver un autre moyen de produire de l'électricité ou bien de réduire la consommation énergétique.

La géothermie peut s'avérer une solution intéressante pour une communauté isolée voulant son indépendance énergétique. En effet, l'énergie géothermique utilise la chaleur emmagasinée dans le sous-sol en produisant de l'électricité à l'aide d'un échangeur de chaleur et de l'eau souterraine à haute température ou en utilisant la chaleur directement pour chauffer les bâtiments.

La présente étude vise à définir et analyser les propriétés thermiques et hydrauliques des lithologies présentes en profondeur sur l'archipel et ainsi identifier les zones potentielles pour l'extraction de l'énergie géothermique.

Carte géologique de l'archipel des îles-de-la-Madeleine



La géologie de l'archipel

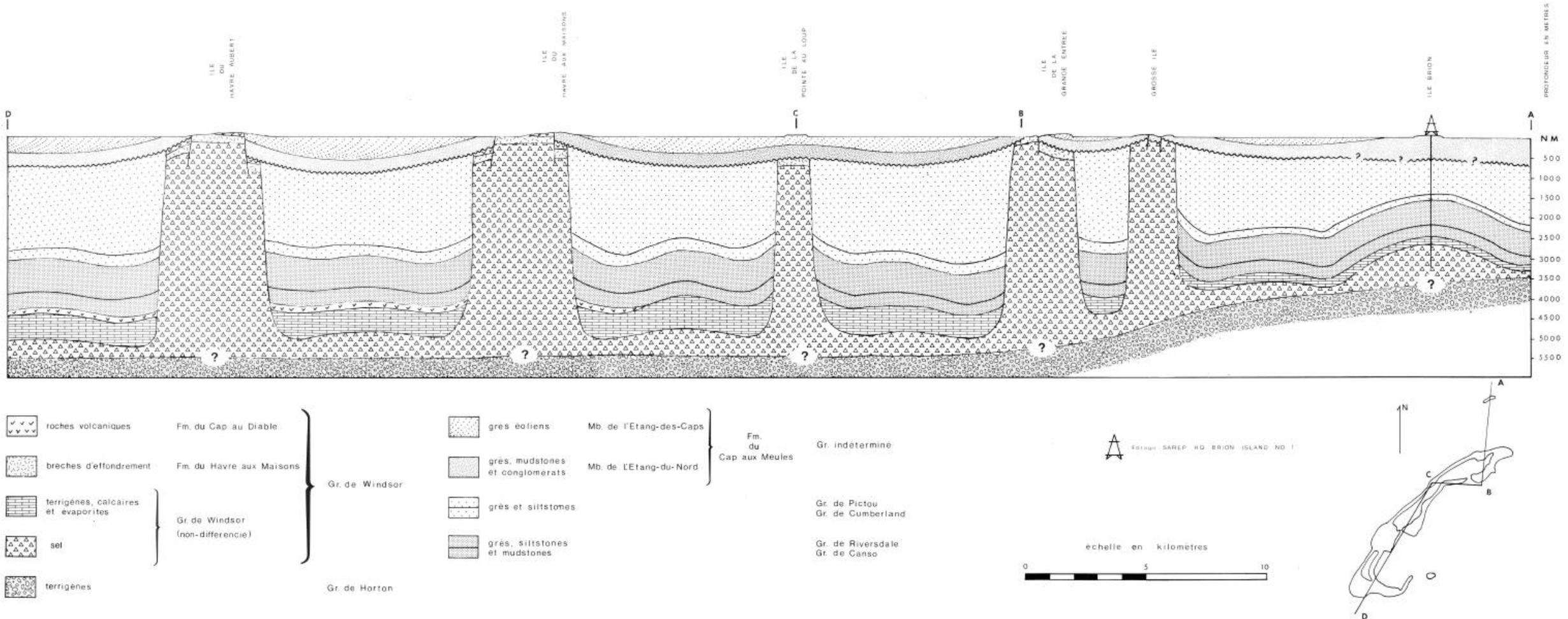
Les roches de cette région appartiennent au bassin sédimentaire de la Madeleine, d'âge Carbonifère, qui s'étendent de la Baie de Fundy au Nouveau-Brunswick jusqu'à White Bay à Terre-Neuve. Cette séquence sédimentaire caractérisée par la présence d'une transgression marine majeure pendant le Viséen contient d'énormes dépôts évaporitiques mis en place sous forme de diapirs (dômes de sel) pouvant atteindre une épaisseur de 5 km par endroits (Brisebois, 1981).

Pour résumer brièvement la géologie présente en surface de l'archipel, la séquence de sédimentation permienne qui repose en discordance sur la séquence carbonifère peuvent être décrits séparément. La première regroupe des lithologies typiques des milieux arides continentaux, soit principalement des grès rouges, et en proportions moindres, des siltstones et des conglomérats rouges. Cette séquence appartient à la Formation du Cap-aux-Meules qui se divise en deux membres: l'Étang-du-Nord et de l'Étang-des-Caps. Ils sont très présents tout autour de l'archipel et sont caractéristiques d'un aspect très friable. La seconde séquence sédimentaire est attirée au Groupe de Windsor, qui est subdivisé en deux formations: Cap-au-Diable et Havre-aux-Maisons. La première est caractérisée par des coulées volcaniques de basalte situés dans la portion Sud de l'archipel. La deuxième consiste en une brèche d'effondrement hétérogène contenant beaucoup de mudrock silteux, de dépôts évaporitiques de gypse et de quelques séquences volcaniques dans le Sud de l'archipel. Cette brèche est probablement liée aux processus diagénétiques des évaporites et des réactions gypse/anhydrite.

Il est à noter également que des dépôts de sable du Quaternaire sont présents sur une grande surface de l'archipel. Ces dépôts, qui relient en surface les îles entre elles, n'ont pas été étudiés pour évaluer les propriétés thermiques dans cette étude, puisqu'ils ne sont que très superficiels et que la présente étude s'intéresse aux ressources géothermiques profondes.

Coupe schématique de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine

Cette coupe est présentée par Brisebois (1981). Elle schématise le sous-sol du centre de chaque île de l'archipel. Ainsi, il est possible d'y voir la géométrie liée aux dômes de sel en profondeur. Dans le cadre de cette étude, il a été possible d'échantillonner presque toutes les lithologies présentes dans cette figure. Les unités géologiques non récupérées ont été approximées avec des propriétés thermiques qui leur était semblables. Ces approximations sont décrites à la page suivante. Comme le montre cette coupe schématique en deux dimensions élaborée par Brisebois (1981), les unités géologiques et les dômes de sel peuvent atteindre jusqu'à 6 km de profondeur.



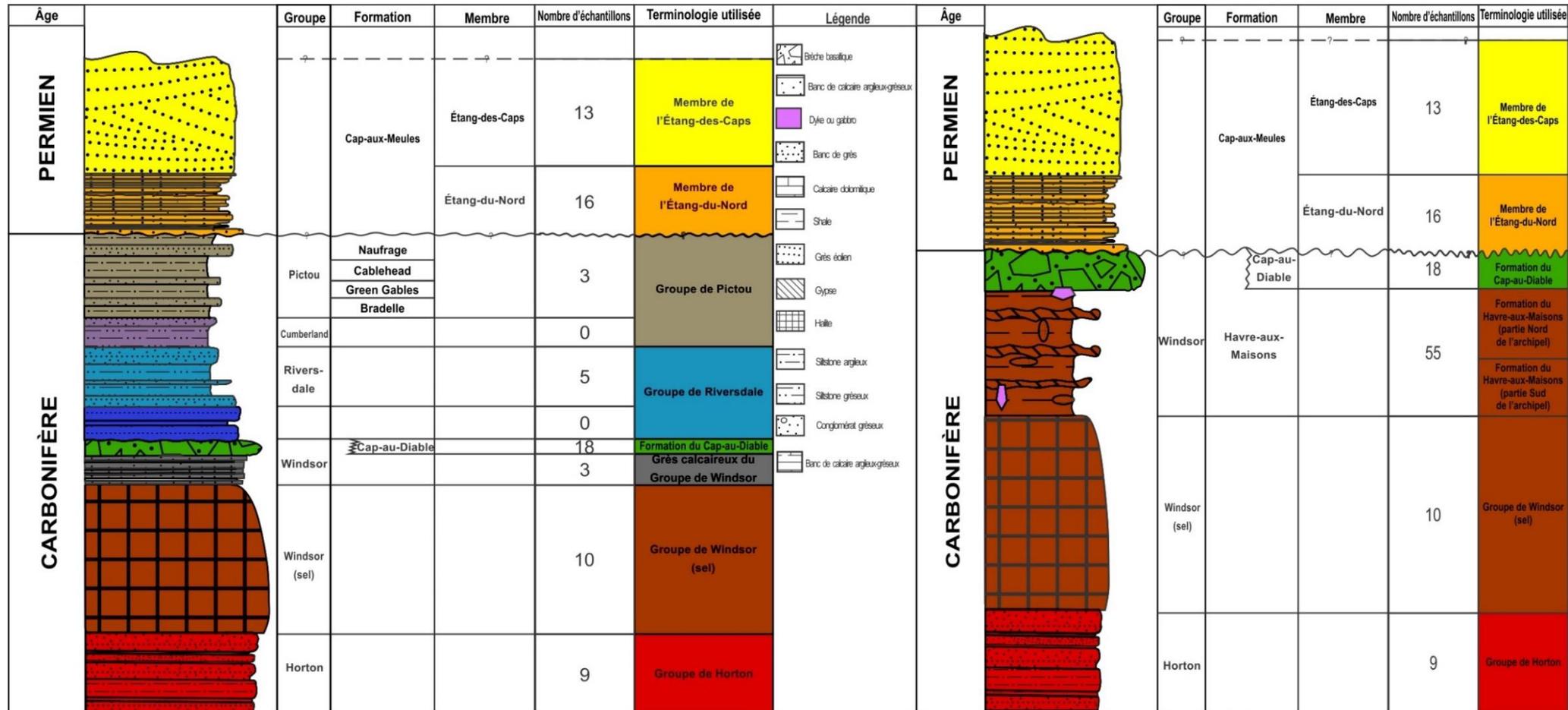
Les lithologies présentes dans l'archipel

Les roches présentes qui n'ont pu être obtenues en surface ont été échantillonnées à l'aide de carottes de roches récupérées lors de forage pétroliers et gaziers effectués au large dans le Golfe du Saint-Laurent. Les Groupes de Pictou, de Riversdale et de Horton ont été récupérés dans l'ensemble de ces forages.

Le Groupe de Pictou et de Riversdale sont plutôt similaires dans leur composition. Les deux contiennent majoritairement des grès et des siltstones dans ce qui a pu être récupéré avec les carottes de forage. Cependant, le Groupe de Pictou contient plus de mudstone selon Brisebois (1981).

Le Groupe de Horton a une composition plus hétérogène. Il est composé de grès, de conglomérats, de shale et de siltstones.

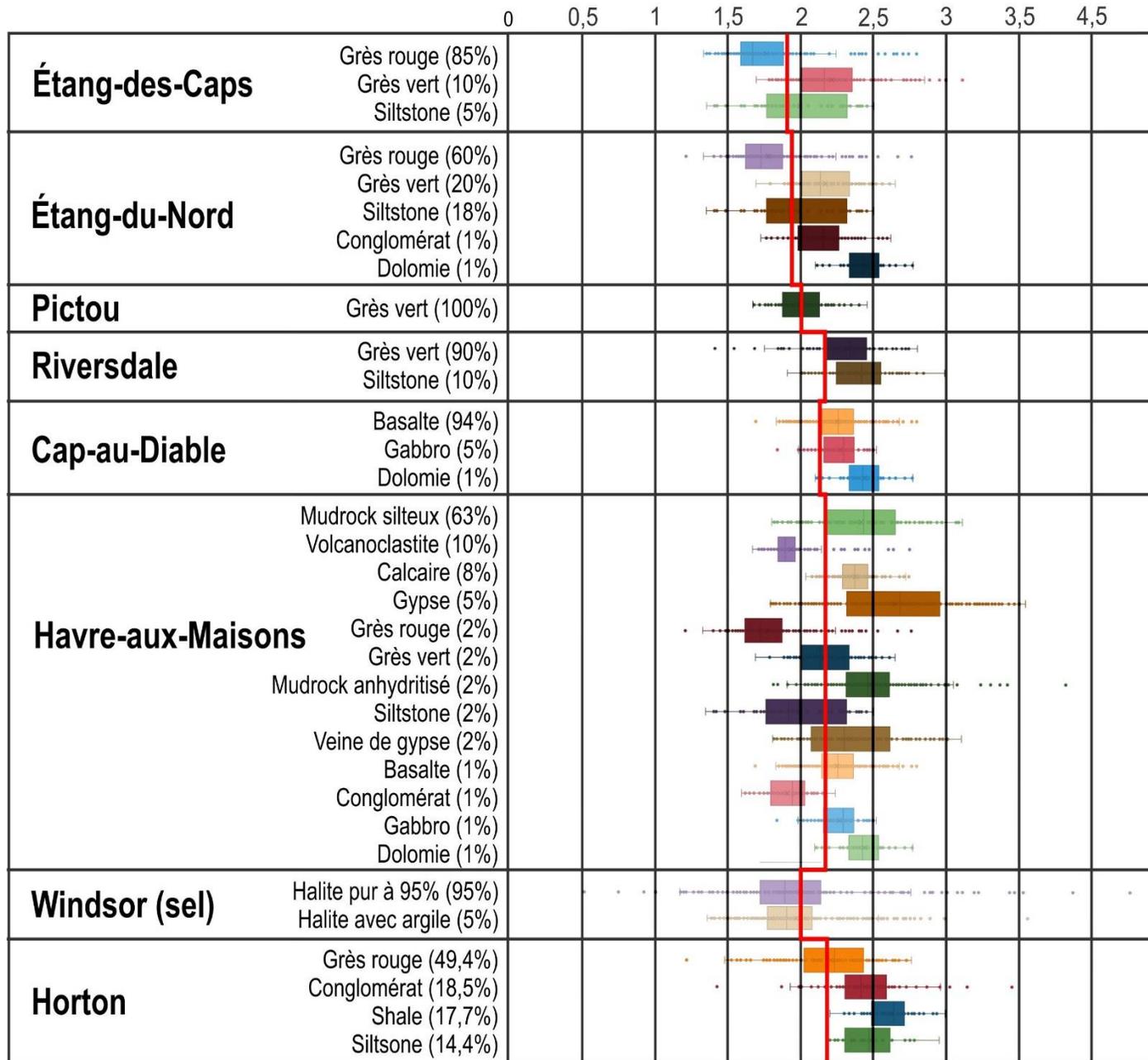
Les figures ci-présentes sont les séquences que l'on peut retrouver jusqu'à une profondeur d'environ 6 km sous les îles selon l'interprétation de Brisebois (1981). La figure de gauche représente la lithostratigraphie entre les dômes de sel alors que celle de droite représente la lithostratigraphie générale que l'on peut identifier à un dôme de sel.



Lithostratigraphie entre les dômes de sel

Lithostratigraphie au niveau des dômes de sel

Capacité thermique ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)



Capacité thermique volumique des lithologies évaluées au scanner infrarouge

Cette propriété thermique est utilisée pour quantifier la capacité d'une lithologie à emmagasiner la chaleur. Il est alors possible de mesurer la quantité d'énergie en mégajoules que l'on peut retirer en abaissant d'un degré celsius un bloc d'un mètre cube la lithologie dont il est question.

Ces mesures ont été obtenues à partir du même appareil (TCS) en déterminant la conductivité thermique et la diffusivité thermique simultanément. La diffusivité thermique est liée au mouvement de chaleur dans l'échantillon. Elle est mesurée avec le capteur de température latéral distancé de la ligne de scan. La capacité est déterminée en effectuant le rapport de la conductivité sur la diffusivité:

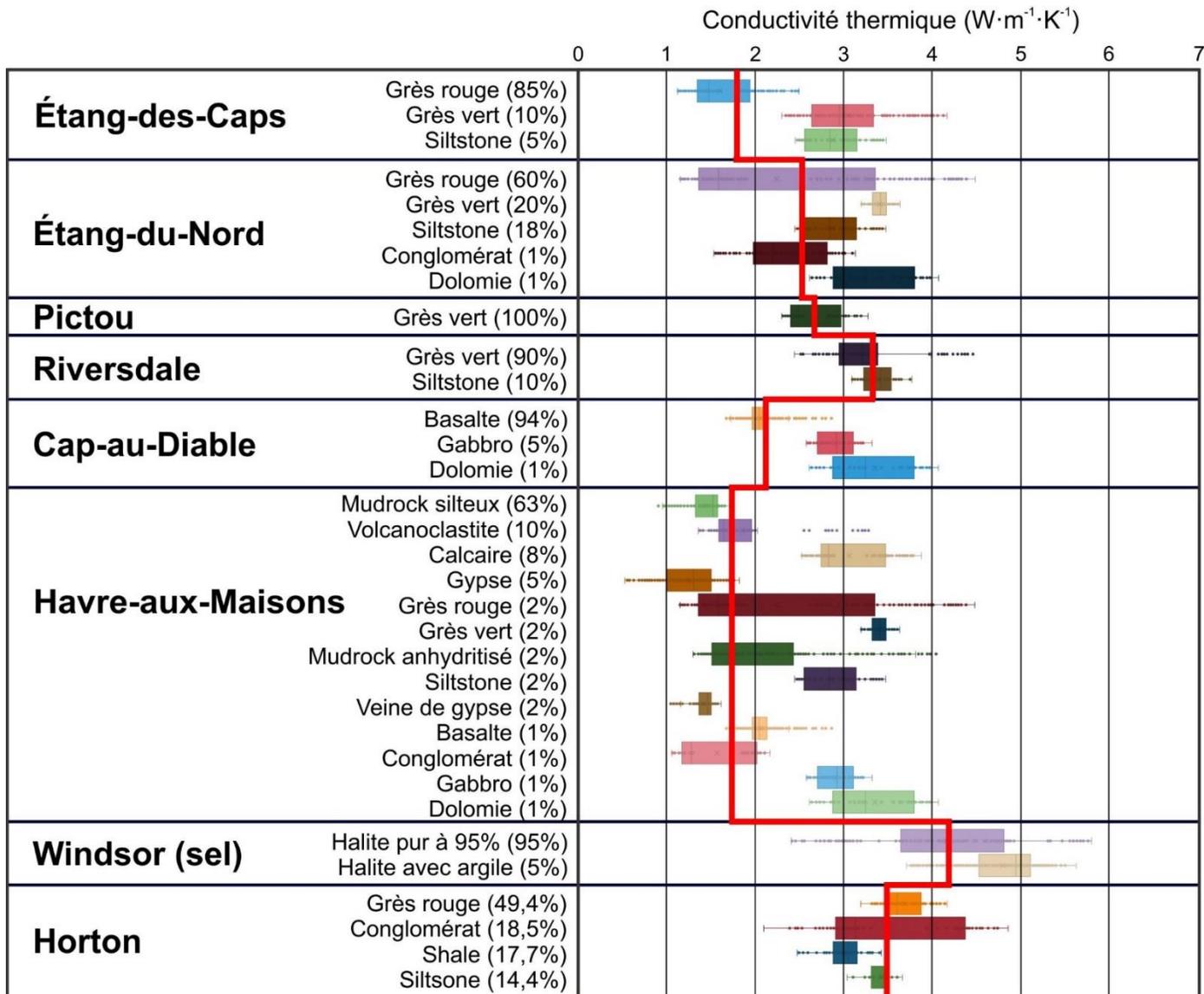
$$\rho C_p = \frac{\lambda}{\alpha} \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

La Formation du Havre-aux-Maisons est le regroupement de lithologies comportant la plus grande capacité thermique. Cette valeur est due en grande partie au mudrock silteux présent dans la formation qui possède généralement une capacité thermique élevée. Le gypse est la lithologie qui possède la plus grande capacité thermique. Il est présent sous forme de dômes dans cette formation et il est considéré comme un excellent matériel emmagasiner la chaleur à cause de sa capacité thermique très élevée (Fuchs et al., 2015).

Tableau des mesures de la capacité thermique en condition sèche

(Les valeurs encadrées en bleu sont les moyennes retenues pour chacun des membres, formations et groupes géologiques étudiés)

Unités géologiques	Lithologie	Capacité thermique volumique moyenne (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Écart-type de la capacité thermique volumique moyenne (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Nombre d'échantillons	Pondération (%)	Moyenne arithmétique de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Moyenne arithmétique de l'écart-type de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Moyenne harmonique de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Moyenne harmonique de l'écart-type de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Moyenne géométrique de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Moyenne géométrique de l'écart-type de la capacité thermique volumique (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)		
Membre de l'Étang-des-Caps	Grès rouge	6,000	0,264	7	85,0			1,811	0,268	1,816	0,268		
	Grès gris-verdâtre	2,216	0,286	4	10,0	1,821	0,268						
	Siltstone	1,999	0,310	2	5,0								
Membre de l'Étang-du-Nord	Grès rouge	1,770	0,215	6	60,0			1,888	0,223	1,895	0,226		
	Grès gris-verdâtre	2,173	0,201	2	20,0								
	Siltstone	1,999	0,310	2	18,0	1,902	0,229						
	Conglomérat calcaireux	2,146	0,200	4	1,0								
	Dolomie	2,448	0,155	2	1,0								
Groupe de Pictou	Grès gris-verdâtre	2,009	0,170	3	100,0	2,009	0,170	2,009	0,170	2,009	0,170		
Groupe de Riversdale	Grès gris-verdâtre	2,307	0,238	3	90,0			2,316	0,236	2,317	0,236		
	Siltstone	2,404	0,219	2	10,0	2,317	0,236						
Formation du Cap-au-Diable	Basalte	2,261	0,167	14	94,0			2,264	0,166	2,264	0,166		
	Gabbro	2,275	0,156	2	5,0	2,264	0,166						
	Dolomie	2,448	0,155	2	1,0								
Formation du Havre-aux-Maisons (partie Sud de l'archipel)	Mudrock silteux rouge ou vert	2,422	0,325	3	63,0			2,348	0,259	2,329	0,216	2,339	0,273
	Volcanoclastite	1,940	0,175	5	10,0								
	Calcaire	2,381	0,132	3	8,0								
	Gypse	2,654	0,425	5	5,0								
	Grès rouge	1,770	0,215	6	2,0								
	Grès gris-verdâtre	2,173	0,201	2	2,0								
	Mudrock silteux noir anhydritisé	2,481	0,261	7	2,0	2,348	0,259						
	Siltstone	1,999	0,310	2	2,0								
	Veine de gypse	2,348	0,321	2	2,0								
	Basalte	2,261	0,167	14	1,0								
	Conglomérat	1,920	0,152	2	1,0								
	Gabbro	2,275	0,156	2	1,0								
	Dolomie	2,448	0,155	2	1,0								
Formation du Havre-aux-Maisons (partie Nord de l'archipel)	Mudrock silteux rouge ou vert	2,422	0,325	3	70,0			2,405	0,304	2,395	0,276	2,400	0,292
	Calcaire	2,381	0,132	3	10,0								
	Gypse	2,654	0,425	5	8,0								
	Grès rouge	1,770	0,215	6	2,0								
	Grès gris-verdâtre	2,173	0,201	2	2,0								
	Mudrock silteux noir anhydritisé	2,481	0,261	7	2,0	2,405	0,304						
	Siltstone	1,999	0,310	2	2,0								
	Veine de gypse	2,348	0,321	2	2,0								
	Conglomérat	1,920	0,152	2	1,0								
	Dolomie	2,448	0,155	2	1,0								
Halite du Groupe de Windsor	Halite pure à 95%	2,006	0,543	5	95,0			2,005	0,532	2,005	0,525	2,005	0,529
	Halite avec argiles et peu de sylvite	1,978	0,321	5	5,0	2,005	0,532						
Groupe de Horton	Grès rouge	2,215	0,286	4	49,4			2,362	0,240	2,367	0,247		
	Conglomérat	2,454	0,294	2	18,5								
	Shale	2,634	0,163	2	17,7	2,373	0,253						
	Siltstone	2,490	0,196	1	14,4								



Conductivité thermique des lithologies évaluées au scanner infrarouge

La conductivité thermique quantifie la capacité d'une lithologie à transmettre la chaleur. Elle est mesurée selon divers méthodes, mais pour ce cas-ci, le scanner infrarouge TCS de Lippman a été utilisé. Il s'agit d'une méthode d'analyse transitoire qui permet d'effectuer plusieurs mesures ponctuelles rapprochées sur un échantillon de façon à caractériser l'hétérogénéité de la roche.

Cet appareil est simple et rapide d'utilisation, car une seule surface plane de l'échantillon suffit pour la prise de mesure. Au fil du test, une source lumineuse et des capteurs thermiques mesurent un profil linéaire de la température sur une bande noire qui a été préalablement peinte sur l'échantillon. En mesurant les différentes températures, une conductivité thermique est évaluée selon le parcours global fait sur l'échantillon. Une erreur d'environ 5% de la mesure de la conductivité thermique est attendue lorsque l'appareil mesure à la fois la conductivité thermique et la diffusivité thermique.

Tous les échantillons récupérés lors de la campagne de terrain ont été analysés avec cet appareil. Ceux-ci ont été classifiés en lithologie-type et celles-ci ont été pondérées selon la proportion (%) de chacune au sein des différents membres, formations ou groupes. Ces proportions ont été élaborées avec une revue des travaux faits par Brisebois (1981) avec également des observations faites sur le terrain.

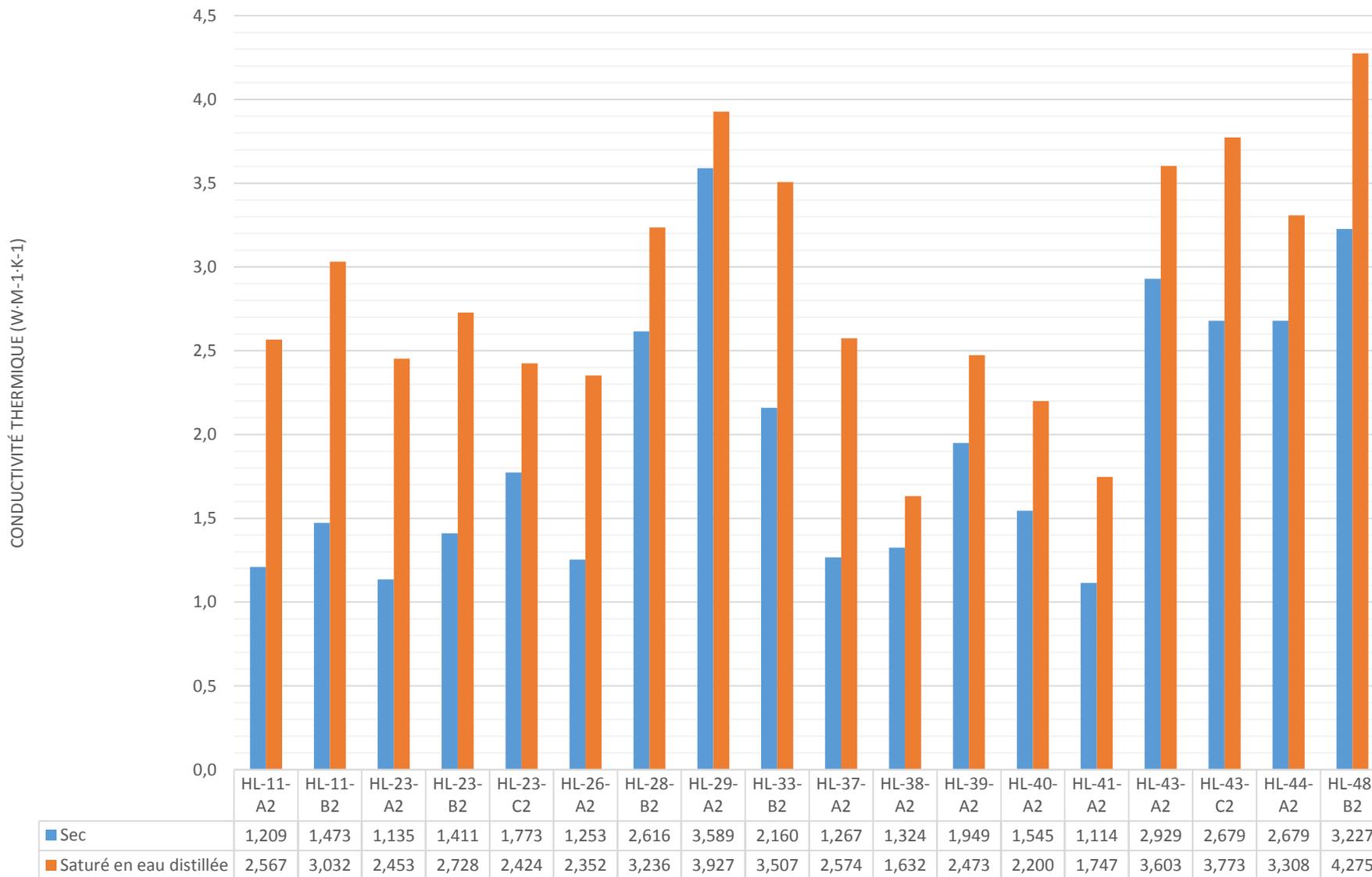
Ces tests ont été faits à température ambiante dans des conditions d'humidité résiduelle présente dans l'échantillon.

La halite comporte la plus grande conductivité thermique comparativement aux lithologies adjacentes aux dômes de sel. La structure des dômes de sel se comportent donc des «cheminées» conductrices où la chaleur circule préférentiellement.

Il est à noter que les résultats obtenus pour la halite ont été affectés par les méthodes utilisées pour préparer les échantillons. Les techniques utilisées habituellement requiert de l'eau dans les procédés pour couper la roche ainsi que pour la peindre. Il a été nécessaire d'éviter ces techniques en utilisant moins d'eau lors de la coupe et en appliquant une peinture à base d'huile sur les échantillons composés de sel.

Comparaison de la conductivité thermique en fonction de la saturation en eau des échantillons

Conductivité thermique des lithologies mesurées au compteur de flux de chaleur

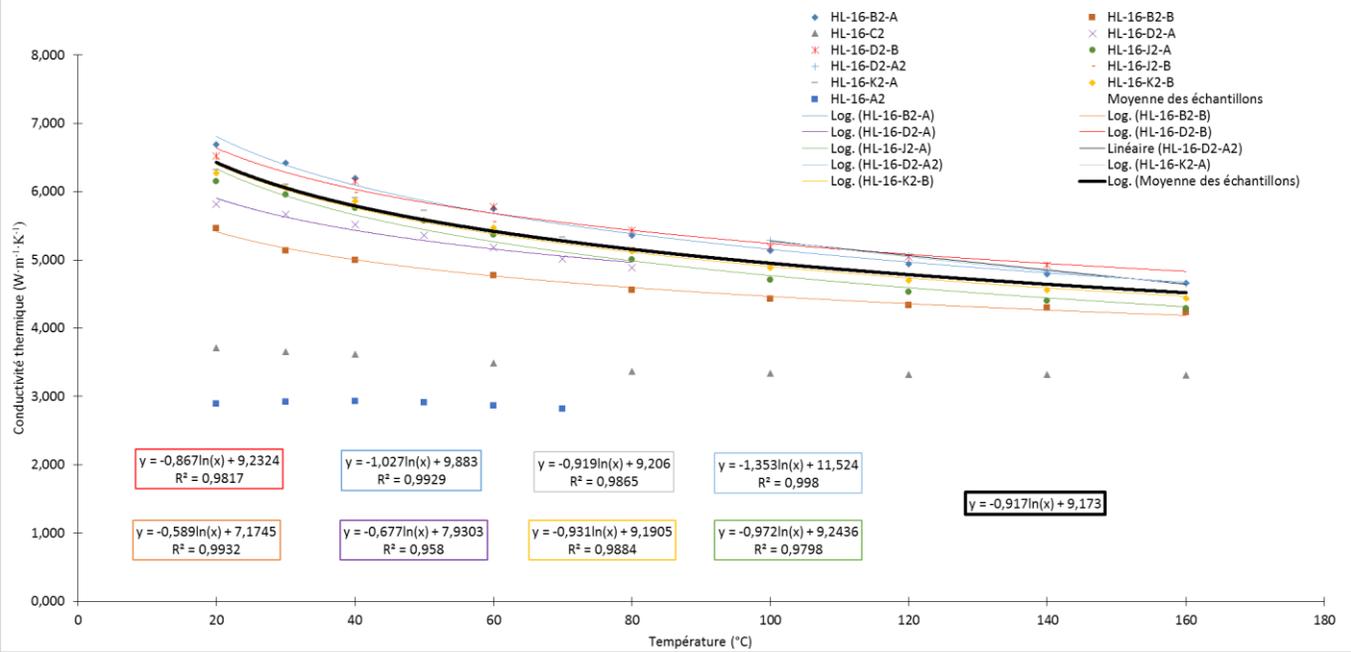


Effectuer les mesures avec l'appareil FOX50 de TA instruments nécessite une plus grande préparation des échantillons. En effet, il est nécessaire de façonner les échantillons en carotte de 2,54 cm de diamètre par 3,5 cm de hauteur. Ces spécifications ont restreint le choix de plusieurs échantillons puisque certains sont fragiles.

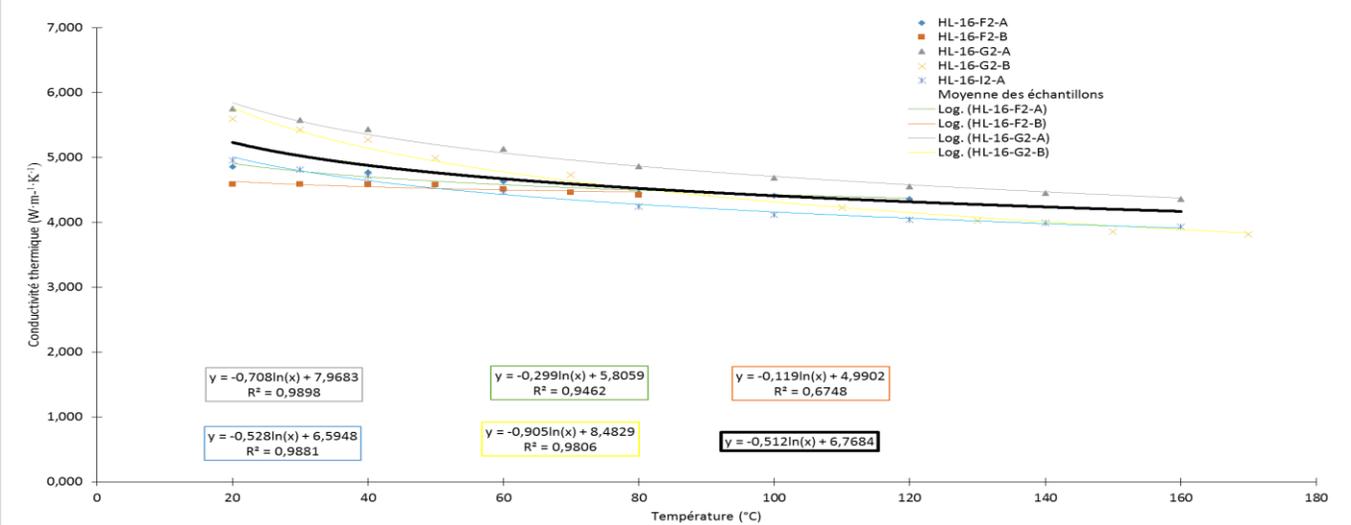
Le FOX50 utilise deux plaques à différentes températures impliquant un flux de chaleur à travers la roche. C'est un compteur de flux de chaleur qui permet d'effectuer des analyses en régime permanent. Il donne une valeur globale de l'échantillon cylindrique analysé. Selon différents paramètres, la conductivité thermique est calculée. Il est également possible de mesurer des échantillons secs et saturés en eau.

Une saturation en eau implique que les pores présentes dans la roches soient comblés en eau. Les résultats suivant indiquent une augmentation de la conductivité thermique, puisque l'eau, conduit mieux la chaleur que l'air. L'augmentation de conductivité thermique dans le même échantillon semble proportionnelle à la porosité de celui-ci.

Graphique de la conductivité thermique de la halite pure à 95% selon la température



Graphique de la conductivité thermique de la halite avec de l'argile et de la sylvite selon la température



Conductivité thermique de la halite à différentes températures

En général, la conductivité thermique des roches sédimentaires croît en fonction de la profondeur, puisque la réduction de conductivité thermique induit par l'augmentation de la température (expansion thermique) est moins importante que l'augmentation de la conductivité thermique causée par la réduction de la porosité selon la pression de confinement exercée sur la roche en profondeur. Toutefois, la halite est un minéral qui montre une décroissance de sa conductivité thermique en fonction de l'augmentation de la température, donc de la profondeur, puisque celle-ci prend de l'expansion de l'ordre de 2% sous l'effet de la chaleur, tandis qu'elle ne se contracte que de 0,5% sous l'effet de la pression (Warren, 2016).

Ces graphiques montrent une certaine tendance selon chaque type de halite qui a été échantillonnée lors de la campagne de terrain. La figure du haut montre les résultats obtenus pour la halite blanche avec quelques inclusions d'anhydrite. Elle est présente en grande majorité dans les dômes de sel. Deux mesures présentes dans le bas du graphique du haut n'ont pas été tenues en compte dans les calculs puisque les échantillons présentaient des surfaces de contact particulièrement abîmées.

La figure du bas montre quant à elle de la halite mélangée avec des argiles et de la sylvite. Cette lithologie possède une plus faible tendance à transmettre la chaleur que la halite blanche.

Les mesures prises à l'INRS ont été effectuées dans un laboratoire à pression ambiante. Il est donc à noter que seulement la variabilité de la conductivité thermique en fonction de la température a été évaluée pour cet essai.

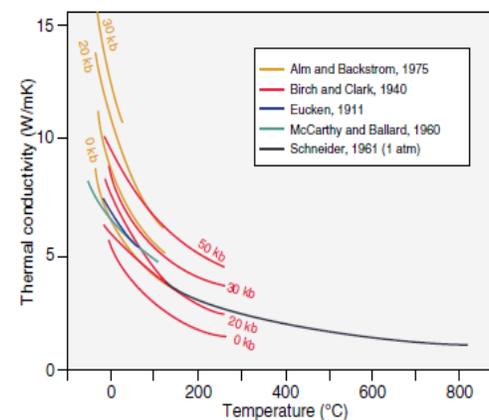


Figure 1: Graphique de la dépréciation de la conductivité thermique de la halite selon la température. Les différentes courbes proviennent de différents auteurs selon différentes conditions imposées où kb est en kilobars. Tiré de Warren (2016).

Tableau des mesures de la conductivité thermique en condition sèche

(Les valeurs encadrées en bleu sont les moyennes retenues pour chacun des membres, formations et groupes étudiés)

Unités géologiques	Lithologie	Conductivité thermique moyenne mesuré au scanner infrarouge (sec) (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Écart-type de la conductivité thermique moyenne mesuré au scanner infrarouge (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Nombre d'échantillons mesurés au scanner infrarouge	Conductivité thermique moyenne mesuré au FOX50 (sec) (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Écart-type de la conductivité thermique moyenne mesuré au FOX50 (sec) (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Nombre d'échantillons mesurés au FOX50	Pondération (%)	Moyenne arithmétique de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Moyenne arithmétique de l'écart-type de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Moyenne harmonique de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Moyenne harmonique de l'écart-type de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Moyenne géométrique de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Moyenne géométrique de l'écart-type de la conductivité thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Membre de l'Étang-des-Caps	Grès rouge	1,583	0,326	7	1,440	0,320	3	85,0	1,672	0,339	1,561	0,332	1,606	0,335
	Grès gris-verdâtre	3,046	0,507	4	2,616	-	1	10,0						
	Siltstone	2,866	0,321	2	-	-	0	5,0						
Membre de l'Étang-du-Nord	Grès rouge	2,121	1,076	6	1,472	0,459	4	60,0	2,134	0,364	1,862	0,270	1,985	0,328
	Grès gris-verdâtre	3,409	0,110	2	3,589	-	1	20,0						
	Siltstone	2,866	0,321	2	-	-	0	18,0						
	Conglomérat calcaireux	3,304	0,466	4	2,076	0,853	2	1,0						
Dolomie	3,359	0,473	2	3,227	-	1	1,0							
Groupe de Pictou	Grès gris-verdâtre	2,666	0,303	3	-	-	0	100,0	2,666	0,303	2,666	0,303	2,666	0,303
Groupe de Riversdale	Grès gris-verdâtre	3,322	0,539	3	-	-	0	90,0	3,329	0,502	3,329	0,447	3,329	0,482
	Siltstone	3,394	0,177	2	-	-	0	10,0						
Formation du Cap-au-Diable	Basalte	2,064	0,166	14	1,969	0,241	3	94,0	2,118	0,199	2,102	0,176	2,109	0,171
	Gabbro	2,911	0,210	2	3,167	0,276	2	5,0						
	Dolomie	3,359	0,473	2	3,227	-	1	1,0						
Formation du Havre-aux-Maisons (partie Sud de l'archipel)	Mudrock silteux rouge ou vert	1,437	0,205	3	1,219	0,148	2	63,0	1,547	0,198	1,407	0,175	1,467	0,186
	Volcanoclastite	1,858	0,461	5	1,747	0,286	2	10,0						
	Calcaire	3,046	0,406	3	2,804	0,177	2	8,0						
	Gypse	1,250	0,319	5	1,238	0,266	2	5,0						
	Grès rouge	2,238	1,076	6	1,472	0,459	4	2,0						
	Grès gris-verdâtre	3,409	0,110	2	3,589	-	1	2,0						
	Mudrock silteux noir anhydritisé	2,056	0,684	7	1,473	0,028	2	2,0						
	Siltstone	2,866	0,321	2	-	-	0	2,0						
	Veine de gypse	1,418	0,316	2	1,753	-	1	2,0						
	Basalte	2,064	0,166	14	1,969	0,241	3	1,0						
	Conglomérat	1,569	0,435	2	-	-	0	1,0						
	Gabbro	2,911	0,210	2	3,167	0,276	2	1,0						
	Dolomie	3,359	0,473	2	3,227	-	1	1,0						
Formation du Havre-aux-Maisons (partie Nord de l'archipel)	Mudrock silteux rouge ou vert	1,437	0,205	3	1,219	0,148	2	70,0	1,506	0,189	1,363	0,168	1,420	0,178
	Calcaire	3,064	0,406	3	2,804	0,177	2	10,0						
	Gypse	1,250	0,319	5	1,238	0,266	2	8,0						
	Grès rouge	2,238	1,076	6	1,472	0,459	4	2,0						
	Grès gris-verdâtre	3,409	0,110	2	3,589	-	1	2,0						
	Mudrock silteux noir anhydritisé	2,059	0,684	7	1,473	0,028	2	2,0						
	Siltstone	2,866	0,321	2	-	-	0	2,0						
	Veine de gypse	1,418	0,316	2	1,753	-	1	2,0						
	Conglomérat	1,569	0,435	2	-	-	0	1,0						
	Dolomie	3,359	0,473	2	3,227	-	1	1,0						
Halite du Groupe de Windsor	Halite pure à 95%	4,159	0,868	5	6,213	0,403	8	95,0	6,160	0,408	6,150	0,407	6,155	0,407
	Halite avec argiles et peu de sylvite	4,797	0,408	5	5,151	0,500	5	5,0						
Groupe de Horton	Grès rouge	3,672	0,221	4	-	-	0	49,4	3,487	0,316	3,469	0,236	3,478	0,265
	Conglomérat	3,502	0,784	2	-	-	0	18,5						
	Shale	3,009	0,227	2	-	-	0	17,7						
	Siltstone	2,866	0,321	2	-	-	0	14,7						

Lithologie	Nombre de données pour la porosité	Porosité moyenne sans pression de confinement (%)	Écart-type de la porosité moyenne (%)	Nombre de données pour la perméabilité	Perméabilité moyenne à une pression de confinement de 500 psi (mD)	Écart-type de la perméabilité moyenne (mD)	Qualification de la perméabilité
Grès rouge du Membre de l'Étang-des-Caps	5	28,95	3,07	0	-	-	-
Grès rouge du Membre de l'Étang-du-Nord	6	27,06	6,27	2	130,26	142,50	Bonne perméabilité
Grès verdâtre du Membre de l'Étang-des-Caps	3	4,79	0,46	1	0,01	-	Perméabilité faible
Grès verdâtre du Membre de l'Étang-du-Nord	3	3,18	0,48	0	-	-	-
Gypse	2	2,65	0,77	0	-	-	-
Calcaire gréseux du Groupe de Windsor	2	2,81	1,76	0	-	-	-
Basalte	1	2,11	-	0	-	-	-
Diabase ou gabbro	2	2,07	0,33	0	-	-	-
Volcanoclastite	2	21,88	6,07	0	-	-	-
Halite blanche	4	2,58	0,88	0	-	-	-
Halite avec argiles et sylvite	2	1,90	0,76	0	-	-	-
Mudrock silteux noir anhydritisé	2	2,63	1,11	0	-	-	-
Mudrock silteux verdâtre	2	9,05	2,41	2	2,75	2,54	Perméabilité faible
Dolomie cristalline	1	11,93	-	1	2,42	-	Perméabilité faible
Conglomérat du Membre de l'Étang-du-Nord	1	19,81	-	0	-	-	-

Porosité et perméabilité

La porosité et la perméabilité à différentes pressions de confinement a été évaluée sur un plage variant de 0-7500 psi. Pour être analysés, les échantillons doivent être cylindriques avec une longueur minimale de 3,40 cm et un diamètre de 2,54 cm.

La porosité est nécessaire pour déterminer le volume de vide présent dans la roche. Avec des relations empiriques étudiées, il est possible d'évaluer la variation de différentes propriétés thermiques qui sont dépendantes de la porosité. La perméabilité est utile quant à elle pour évaluer l'écoulement qu'il peut y avoir dans une lithologie. En géothermie, la perméabilité est utile pour évaluer si une roche présente un meilleur potentiel de captage d'eau souterraine. Les formations réservoirs peuvent être identifiés puisqu'elles ont des perméabilités plus grandes. Ces mesures ne peuvent être faits que pour évaluer la porosité primaire des échantillons. La porosité secondaire ne peut être évaluée avec cet appareil.

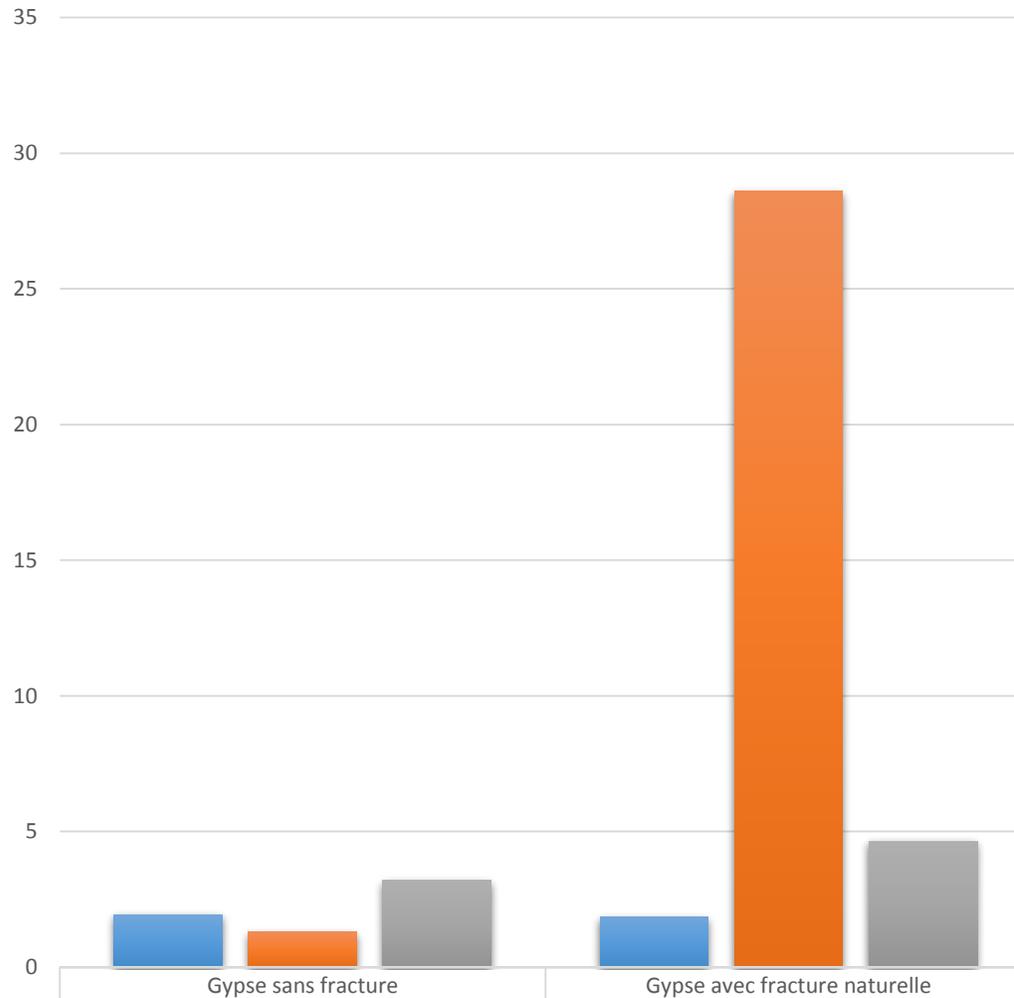
Un faible nombre de données a été obtenue pour l'évaluation de la perméabilité, car peu d'échantillons avaient les dimensions adéquates pour mesurer cette propriété. Cependant, la porosité a été mesurée sur tous les échantillons.

Comme les échantillons doivent être carottés et qu'ils doivent être en bonne condition, il n'a pas été possible d'obtenir des mesures pour toutes les lithologies. Il est à noter que ces tests sont représentatifs à l'échelle de la matrice de la roche. Pour être mesurés, ces échantillons ne tenaient pas compte des fractures et des conditions in situ de la roche. Par exemple, le basalte de la Formation du Cap-au-Diable présente une très faible porosité et perméabilité, par contre, sur le terrain, un aspect très fracturé de cette formation a été observé, ce qui augmente sans doute la valeur de ces propriétés hydrauliques in situ.

Les résultats de chaque échantillon avec les différentes pressions de confinement appliquées ont été ajoutés à la base de donnée du Laboratoire Ouvert de Géothermie (LOG) de l'INRS.

Il est à noter que le grand écart-type de la perméabilité du Membre de l'Étang-du-Nord est dû par l'aspect différent des deux échantillons. L'un présente une faible valeur de perméabilité et de porosité puisque la roche est exposée sur une colline sans être saturée. L'autre échantillon semble moins consolidé avec des valeurs plus élevées de perméabilité et de porosité. Il est généralement plus saturé que l'autre échantillon.

Comparaison de la porosité et de la perméabilité entre un échantillon de gypse avec et sans fracture naturelle



■ Porosité à une pression de confinement de 5000 psi (%)	1,942	1,861
■ Perméabilité à une pression de confinement de 5000 psi (mD)	1,294	28,605
■ Porosité sans pression de confinement (%)	3,191	4,645

Porosité et perméabilité avec et sans fracture naturelle

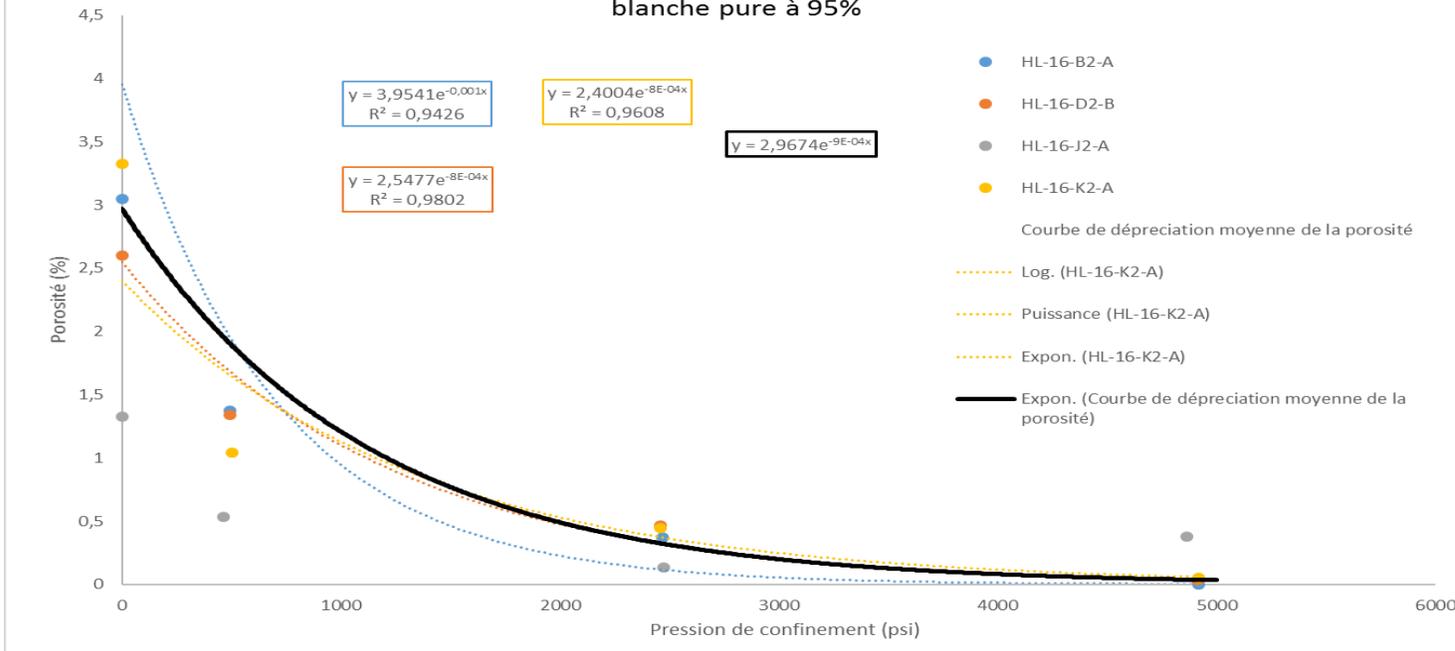
Au cours de la préparation des échantillons, l'échantillon HL-15-A2 a été carotté avec une fracture verticale en son centre. Une seconde carotte a été ensuite réalisée dans ce même échantillon afin de la comparer avec la même lithologie intacte. Les mesures n'ont pu être prises à toutes les pressions de confinement essayées et c'est pour cela que la comparaison a seulement été réalisée à une pression de confinement de 0 et de 5000 psi.

Le changement de porosité entre les deux échantillons est semblable. Par contre, l'échantillon fracturé présente une perméabilité plus significative que celui intact. Il est donc intéressant d'imaginer, à des profondeurs considérables, que la roche est beaucoup plus perméable en condition in situ avec la présence de fractures naturelles.



Photo de l'échantillon de gypse fracturé HL-15-A2-B (gauche) et l'échantillon de gypse intact HL-15-A2-A (droite).

Graphique de la porosité en fonction de la pression de confinement appliquée à la halite blanche pure à 95%



Revue de la littérature des propriétés thermiques et hydrauliques de la halite

Jackson et Talbot (1994) ont mesurés l'expansion ou la contraction de la halite sous un gradient géothermique de 30 °C/km et à une profondeur de 5 km. Ils énoncent que la conductivité thermique de la halite à 43 °C est de 5,73 W·m⁻¹·K⁻¹. À cette condition de pression et température, ils ont observé que la roche se dilate de 2% dû à la température et qu'elle se contracte de 0,5% dû à la pression.

En utilisant les formules ici-bas, les courbes de tendance calculées en laboratoire ainsi que les mêmes valeurs de gradient géothermique et de profondeur utilisées par Jackson et Talbot (1994), il a été possible de calculer un facteur lié à la perte de conductivité thermique dû à la chaleur. La contraction de la roche due à la pression de confinement a aussi été calculée.

À l'aide des données du rapport de forage pétrolier BRION ISLAND NO.1, la moyenne mesurée de la densité de la halite équivaut à d'environ 2232 kg/m³, la pression lithostatique (formule 1) à une profondeur de 5 km correspond à environ 15 879 psi. En trouvant la porosité à l'aide de la courbe de dépréciation moyenne de la porosité calculée et de la pression trouvée précédemment, on y retrouve une porosité négligeable de 1,84E-06 %. Avec la même courbe, on peut supposer que la contraction résultante dû à la pression est d'environ 2,97%.

À une pression en confinement de 0 psi, la porosité moyenne des échantillons de sel est de 2,97%. Il est possible de calculer la conductivité thermique de la matrice de sel puisque la conductivité thermique de l'air est de 0,026 W·m⁻¹·K⁻¹ (AGU, 1995). À l'aide de la formule 2, cette conductivité matricielle équivaut à 7,276 W·m⁻¹·K⁻¹, si l'on tient compte de la conductivité thermique in situ du sel, qui est de 6,155 W·m⁻¹·K⁻¹ à 20°C. Cette mesure provient du tableau précédent avec les pores des échantillons saturés en air.

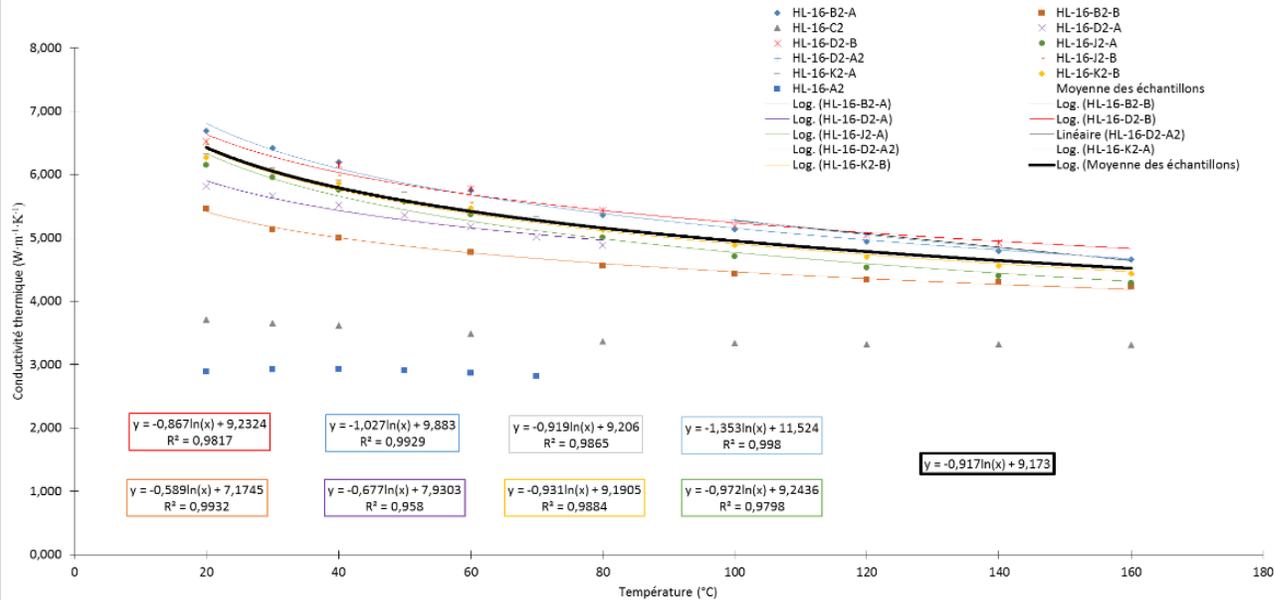
Donc, à une profondeur de 5 km, il y a un gain de conductivité thermique d'environ 1,121 W·m⁻¹·K⁻¹ puisque la porosité est considérée négligeable en raison de la pression lithostatique.

$$(1) \text{ Pression lithostatique} = 0,000145038 \cdot (\rho_{roche} \cdot g \cdot z) \quad (\text{psi})$$

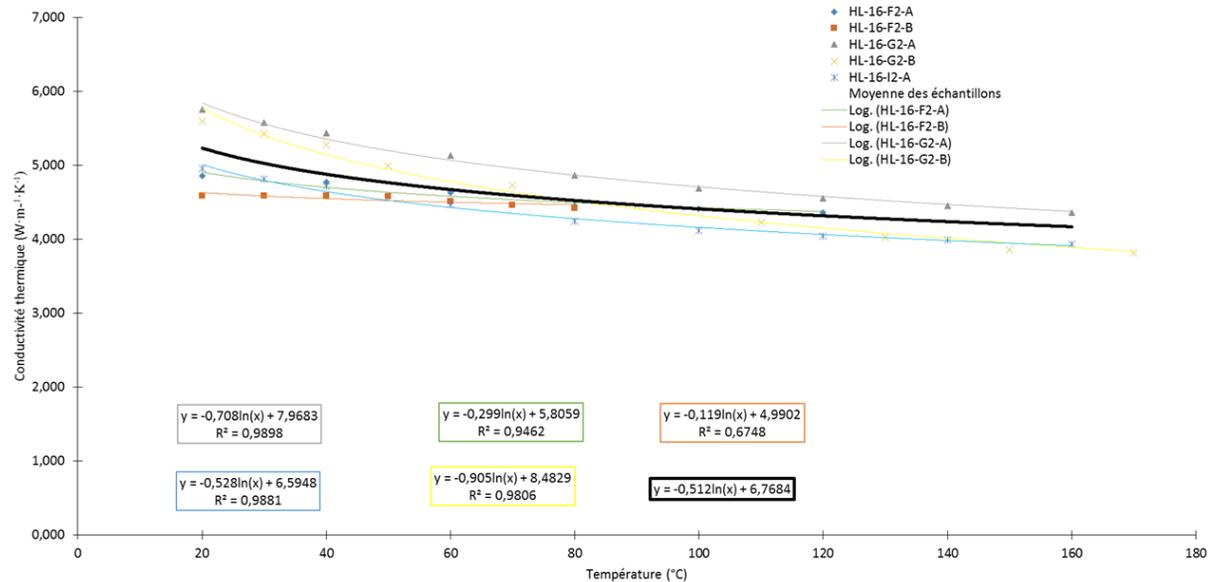
$$(2) \lambda_{in\ situ} = \lambda^{(1-\theta)}_{matrice} \cdot \lambda^{\theta}_{fluide} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

Formule 2 tirée de Warren (2016).

Graphique de la conductivité thermique de la halite pure à 95% selon la température



Graphique de la conductivité thermique de la halite avec de l'argile et de la sylvite selon la température



Revue de la littérature des propriétés thermiques et hydrauliques de la halite

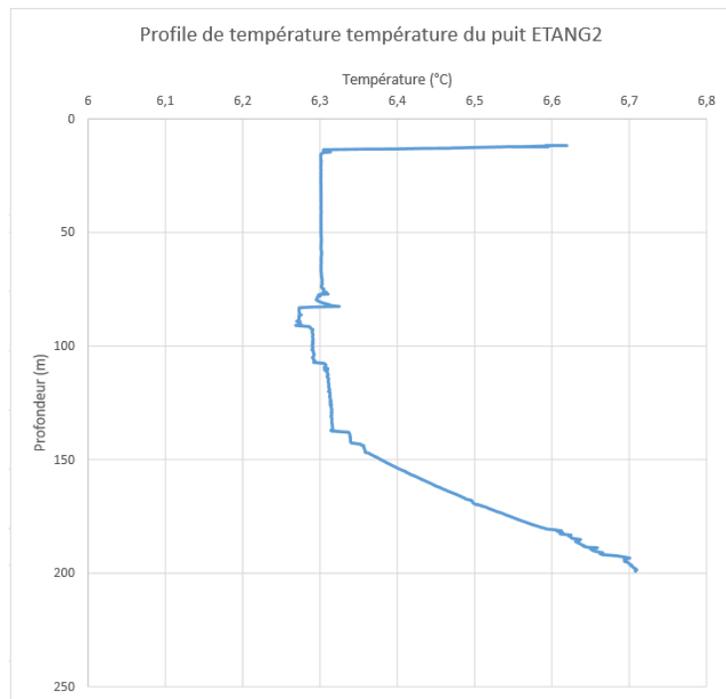
En imposant une conductivité thermique mesurée de $6,155 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (mesure prise au FOX50 dans le tableau des conductivités thermiques) à température ambiante et une conductivité thermique in situ de $4,558 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 150°C (calculé avec la formule 3), on retrouve un facteur d'environ 25,94% qui explique la perte de conductivité thermique. Ce facteur peut dépendre principalement de la porosité et d'autres facteurs à la fois. Ce facteur n'est pas complètement dépendant avec la différence de porosité due à l'expansion thermique. Cependant, il indique un grand écart entre la mesure prise à 20°C et à 150°C . La dépréciation de la conductivité thermique en fonction de la température engendre donc une perte de $1,597 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

En soustrayant la perte de conductivité thermique avec le gain de conductivité thermique causé par la destruction de la porosité à la page précédente, il en résulte une perte de $0,476 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Cette perte de 7,73% de la conductivité thermique sous ces conditions est typique de la halite. Ces mesures sont propres aux dômes de sel présents aux Îles-de-la-Madeleine et permettent de mieux comprendre la variation de la conductivité thermique du sel dans l'archipel.

En somme, les résultats présentent une corrélation avec la littérature en ce qui concerne à la décroissance de la conductivité thermique avec la profondeur. Cependant, il n'a pas été possible de calculer l'expansion thermique comme l'ont fait Jackson et Talbot (1994).

(3) $\lambda_T = -0,897 \cdot \ln(T) + 9,053$ ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) où T est en degré Celsius.

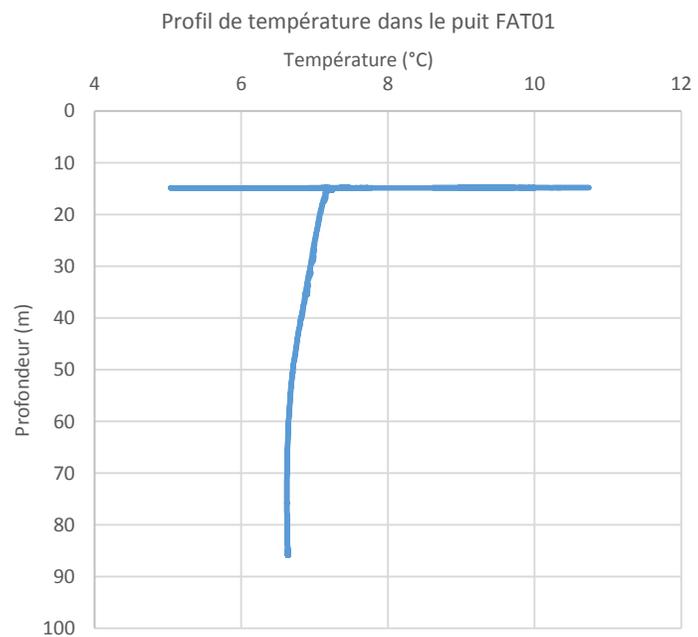
(4) Facteur lié à la perte de conductivité thermique = $1 - (\lambda_{20^\circ\text{C}}/\lambda_{150^\circ\text{C}})$



Profils de température dans les puits de la municipalité

Le profil de température du puit ETANG2 est le plus profond. Ce forage est situé dans le Membre de l'Étang-des-Caps et il est bordé principalement de grès rouge. Il est parsemé de fractures perméables qui causent l'abaissement succin de la température dans le profil. Le gradient géothermique calculé à la base est d'environ de 6,925 °C/km. Le faible gradient thermique est probablement causé par l'écoulement régional perturbant l'eau du puit ETANG2.

Le profil de température du puit de FAT01 se situe également pour sa part dans le Membre de l'Étang-des-Caps. Ce puit est bordé de grès rouge typique de ce membre géologique. Il a été observé que la température diminue jusqu'à une profondeur d'environ 60 m. Ce phénomène est probablement causé par l'écoulement souterrain régional qui refroidit le sol. En effet, en observant l'emplacement du puit, il est possible que cette infiltration soit causée par la plus grande perméabilité de ce Membre comparativement à la Formation du Cap-au-Diable qui est à proximité. L'eau d'infiltration a donc tendance à se diriger vers le Membre de l'Étang-des-Caps, ce qui cause une perturbation de la température.



L'emplacement des puits de cette étude sont tous situés dans le Membre de l'Étang-des-Caps. Il serait recommandé d'effectuer d'autres profils de température au centre de divers unités géologiques (si possible) et de les comparer ensemble pour obtenir des informations supplémentaires pour comprendre davantage la distribution de la chaleur aux Îles-de-la-Madeleine.

Conclusion

Cette étude préliminaire présente des résultats comparables à ceux retrouvés dans la littérature scientifique. De plus, elle offre de nouvelles mesures thermiques propres à l'archipel des Îles-de-la-Madeleine nécessaires à l'élaboration de simulations numériques afin d'évaluer la distribution de chaleur dans le sous-sol.

Les propriétés thermiques et hydrauliques des roches présentes montrent une grande variation, ce qui affectera la transmission de la chaleur générée par les dômes de sel. En effet, il est possible d'observer une différence de conductivité thermique pouvant presque atteindre les $4,287 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ entre le sel du Groupe de Windsor et les sédiments de la Formation du Havre-aux-Maisons. Les dômes de sel possèdent une conductivité thermique importante. Ils peuvent ainsi bien transmettre la chaleur jusqu'en surface pour atteindre les lithologies considérées isolantes comme le gypse. Ces contrastes de propriétés thermiques peuvent donc emmener des anomalies de chaleur dans le sous-sol. Il faut cependant être vigilant quant à assumer la présence de gypse en profondeur puisque ce minéral a tendance à se déshydrater pour former de l'anhydrite, un minérale qui possède une conductivité thermique plus élevée que le gypse (AGU, 1995).

Cette étude préliminaire a été effectuée pour l'évaluation du potentiel des ressources géothermiques profondes des Îles-de-la-Madeleine. Cette évaluation est généralement faite pour définir s'il est profitable pour une communauté de récupérer des fluides suffisamment chauds à des profondeurs raisonnables. Il est alors possible d'exploiter cette ressource pour construire des réseaux de chaleur urbain pouvant réduire considérablement la consommation de mazout liée au chauffage des bâtiments. Il est cependant à noter que le développement des pompes à chaleur géothermique à des profondeurs superficielles où les températures ne varient que de quelques degrés Celsius est aussi possible. Cette technique, moins coûteuse, peut aussi contribuer à réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et le potentiel de déploiement des systèmes dépend essentiellement de la conductivité thermique du sous-sol. Pour utiliser les pompes à chaleur géothermique à de faibles profondeurs, il est préférable d'exploiter ce système dans une lithologie ayant une conductivité thermique élevée pour assurer un bon transfert de chaleur. Pour les réservoirs géothermiques profonds, une lithologie ayant une faible conductivité thermique est préférable pour obtenir un gradient géothermique supérieur et ainsi, réduire les coûts de forage. Des simulations numériques de transfert de chaleur dans le sous-sol des Îles-de-la-Madeleine sont à envisager pour les anomalies de température en profondeur.



Références

AGU (1995). *Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants*, [Format électronique]. American Geophysical Union: Washington. P.105-126

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*, [Format électronique]. Bureau et Archives nationales du Québec. Rapport d'enquête et d'audience publique: Rapport 297.

BRISEBOIS D. (1981). *Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des îles de la Madeleine*. Ministère de l'énergie et des ressources.

FUCHS S. et al. (2015). *Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs*, [Format électronique]. Geophysics Journal International: GJI Mineral physics, rheology, heat flow and volcanology.

JACKSON M. P. A., TALBOT C. J. (1994). *Advances in salt tectonics*. Continental deformation: Tarrytown, NY, Pergamon Press, p. 159–179.

WARREN J. (2016). *Evaporites: A Geological Compendium – Second Edition*, [Format électronique]. Springer International Publishing: Switzerland. P.1822

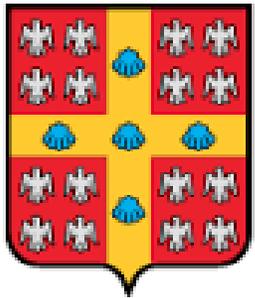
**Fonds de recherche
Nature et
technologies**

Québec 



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
A RESEARCH UNIVERSITY



**UNIVERSITÉ
LAVAL**



**CRSNG
NSERC**



Mines Seleine
K+S Sel Windsor Ltée

**Énergie et Ressources
naturelles**

Québec 