



Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement

## ÉVALUATION DU POTENTIEL DES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUE POUR LA COMMUNAUTÉ NORDIQUE DE KUUJJUAQ

Par

Inès Kanzari

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) en sciences de la terre

## Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne

Examinateur externe

Directeur de recherche

Codirecteur de recherche

Louis-César Pasquier INRS-ETE

Louis Gosselin Université Laval

Jasmin Raymond INRS-ETE

Erwan Gloaguen INRS-ETE

© Droits réservés de « Inès Kanzari », juillet 2019

La première personne que je tiens à remercier est mon directeur de recherche, le professeur *Jasmín Raymond*, qui s'est astreint à corriger minutieusement ce travail. Je le remercie sincèrement pour son bon encadrement avec tant de patience et de pédagogie, son soutien, ses remarques et ses conseils constructifs qui m'ont été précieux. Par son expérience, son don d'écoute et sa tolérance, il a guidé mon activité tout en m'aidant à développer mon esprit d'initiative durant cette expérience professionnelle et m'a fait travailler dans la bonne humeur. Je me suis sentie motivée et encouragée chaque fois que j'ai participé à ses rencontres. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements, mon profond respect et ma gratitude. Vous restez parmi les meilleurs professeurs qui ont marqué ma vie universitaire avec une toute particulière sympathie. MERCI...

Je tiens à remercier sincèrement mon codirecteur de recherche, le professeur *Erwan Gloaguen.* Je lui adresse mon énorme gratitude pour son encouragement continu, son soutien moral et sa générosité d'encadrement. Je le remercie vivement pour l'aide qu'il m'a offerte surtout dans la partie géophysique de ma recherche.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aussi aux autres membres de jury, soient les professeurs *Louís Gosselín* et *Louís-César Pasquíer* pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail.

Je remercie spécialement *Nícolò Gíordano* pour ses riches conseils, son support inconditionnel, avoir eu l'amabilité de partager son savoir-faire pour m'aider dans ce projet avec une toute particulière sympathie.

J'aimerai adresser mes gratitudes envers ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à concrétiser ce travail, notamment le groupe de recherche de M. Raymond :

*Félix-Antoine Comeau*, *Chrystel Dezayes* et *Mafalda\_Alexandra Miranda*, ainsi que tous les autres collègues de l'INRS et l'université Laval avec qui j'ai eu l'honneur de travailler pendant deux années et plus.

### Enfin, j'exprime ma gratitude envers ma famílle en Tunísie.

Aucune dédicace ne saurait exprimer le grand amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour eux. Rien au monde ne vaut leurs efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être.

## RÉSUMÉ

La présente contribution porte sur l'évaluation de la faisabilité d'opération des systèmes de pompes à chaleur (PÀC) géothermique à Kuujjuaq, la capitale des quatorze communautés inuites situées au Nunavik où le diesel est la principale source d'énergie disponible pour le chauffage. L'utilisation de PÀC géothermique apparait comme une alternative, mais elles doivent être opérées dans un milieu froid avec des charges de bâtiments débalancées. L'objectif de ce projet de recherche fut d'évaluer la viabilité des PÀC géothermique dans un tel climat subarctique.

À cette fin, des données de tomographie de résistivité électrique (ERT) ont été analysées pour évaluer la continuité spatiale du pergélisol à des endroits spécifiques. Aussi, vingt échantillons de sédiments quaternaires et vingt-quatre échantillons de roches ont été ramassés pour analyser leurs propriétés thermiques et hydrauliques en laboratoire, démontrant une conductivité thermique moyenne de 1,6 et 3 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement. Finalement, une simulation énergétique d'un bâtiment de référence a été réalisée avec SIMEB afin d'estimer sa consommation en chauffage. Des simulations analytiques de l'opération de PÀC géothermique ont été effectuées avec GLHEPro pour évaluer les économies d'énergies potentielles, qui sont de l'ordre de 54,7 à 76 %.

L'étude démontre qu'une PÀC géothermique peut fonctionner dans un climat subarctique et être une alternative locale pour réduire la consommation du diesel dans les communautés nordiques du Québec.

**Mots-clés :** Énergie, géothermie, subarctique, consommation énergétique, conductivité thermique, Nunavik.

## ABSTRACT

This research focuses on the evaluation of the operational feasibility of ground source heat pump (GSHP) systems in Kuujjuaq, the capital of the fourteen Inuit communities in Nunavik where diesel fuel is the main source of energy available for heating. GSHPs appear to be a viable alternative, but their operation in a cold climate with highly unbalanced heating loads needs to be investigated. Hence, the objective of this study was to evaluate the technical viability of GSHP in such a subarctic climate.

For this purpose, electrical resistivity tomography (ERT) data were analyzed to evaluate the presence of discontinuous permafrost at specific locations. Then, twenty quaternary sediment samples and twenty-four rock samples were collected to analyze their thermal and hydraulic properties in the laboratory, indicating an average thermal conductivity of 1.6 and 3 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, respectively. Finally, an energy simulation of a reference building was carried out with SIMEB to estimate its heating consumption. Analytical simulations of the GSHP operation were carried out with GLHEPro to evaluate the potential energy savings, which proved to be on the order of 54.7 to 76 %.

The study demonstrates that GSHP can operate in a subarctic climate and can be a local alternative to reduce the diesel consumption in the northern communities of Québec.

**Keywords :** Energy, geothermal, subarctic, energy consumption, thermal conductivity, Nunavik.

REMERCIEMENTS III			
RÉSUMÉV			
ABSTRAC	ст VII		
TABLE DI	ES MATIÈRESIX		
LISTE DE	S FIGURES		
LISTE DE	S TABLEAUXXV		
LISTE DE	S ABRÉVIATIONSXVII		
1 INTE	RODUCTION GÉNÉRALE1		
1.1	Mise en contexte 1		
1.1.1	Contexte géographique 1		
1.1.2	Contexte climatique2		
1.1.3	Contexte géologique 4		
1.2	Problématique		
1.3	Objectifs		
1.4	Revue de littérature 7		
1.4.1	Les ressources et technologies géothermiques superficielles		
1.4.2	Travaux antérieurs en climat froid9		
2 MÉT	HODOLOGIE		
2.1	Approche géophysique 14		
2.1.1	Tomographie de la résistivité électrique14		
2.2	Échantillonnage		
2.3	Évaluation en laboratoire des propriétés thermiques		

	2.3.1	Principe de base	18
	2.4	Simulations analytiques de bâtiment et sous-sol	. 23
	2.4.1	Simulation énergétique d'un bâtiment type	23
	2.4.2	Simulations énergétiques de systèmes de PÀC géothermique	26
3	RÉS	ULTATS	34
	3.1	Profils de résistivité électrique	. 34
	3.2	Distribution des propriétés thermiques	. 36
	3.3	Température du sous-sol	. 43
	3.4	Profils de charges de consommation énergétique	. 44
	3.5	Température d'opération des systèmes géothermiques simulés	. 46
	3.6	Énergie et coûts liés au chauffage	. 50
4	DISC	CUSSION	51
5	CON	ICLUSIONS	55
	5.1	Synthèse des résultats	. 55
	5.2	Perspectives et recommandations	. 55
6	RÉF	ÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57
7	ANN	EXES	61
	7.1	Logs lithostratigraphiques des puits	. 61
	7.2	Corrélation lithostratigraphique des puits	. 62
	7.3	Profils de résistivité électrique	. 63
	7.4	Mesures de caractéristiques thermiques par échantillon	65
	7.5	Bilan de la consommation énergétique pour la simulation du bâtim	ent
	de réfé	rence	. 71
	7.6	Scénarios de simulations de la réponse thermique des échangeurs	3 de
	chaleur.		.72

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Réservoir de diesel pour le chauffage d'un bâtiment à Kuujjuaq 1
Figure 1.2	Localisation de Kuujjuaq (modifiée selon Comeau et al. 2017) 2
Figure 1.3 Québec (mod	Distribution de la température moyenne annuelle de la surface et du sous-sol au difiée de Comeau et al. 2017)
Figure 1.4	Normales climatiques à Kuujjuaq (Environnement Canada, 2004)
Figure 1.5	Carte géologique du roc à Kuujjuaq (Gouvernement du Québec, 2003) 5
Figure 1.6	Carte des dépôts meubles à Kuujjuaq (Gouvernement du Québec, 2003) 5
Figure 1.7	Distribution du pergélisol au Québec (modifiée de Lemieux et al. 2016) 6
Figure 1.8 Bardeau et a	Schéma d'un système de PÀC géothermique (modifiée selon Ghyselinck- l. 2007)
Figure 2.1	Localisation des sondages ERT effectués à Kuujjuaq15
Figure 2.2	Localisation des échantillons de dépôts meubles prélevés à Kuujjuaq17
Figure 2.3	Échantillonnage de till17
Figure 2.4	Localisation des échantillons de roches prélevés à Kuujjuaq18
Figure 2.5 aiguille de De	Mesure des propriétés thermiques de dépôts meubles avec une sonde à double ecagon dont le modèle est KD2Pro19
Figure 2.6 Laser comp distillée	Mesure de propriétés thermiques du roc avec un compteur de flux de chaleur dont le modèle est FOX-50 et saturation des échantillons avec de l'eau 
Figure 2.7 608	Mesure de la porosité de roches avec le porosimètre au gaz de Coretest AP- 
Figure 2.8	Bâtiment de référence (Lévesque, 2015)24
Figure 2.9 2019)	Diagramme schématique du fonctionnement d'une PÀCGÉ (ADEME et BRGM, 
Figure 2.10 PÀCGÉ Clim	Variation du <i>COP</i> en chauffage en fonction de la température à l'entrée de la ateMaster pour le modèle TCH/V07228
Figure 2.11 CEGIBAT, 20	Diagramme schématique du fonctionnement d'une PÀCGA (modifiée selon 019)

Figure 2.12	Variation du COP en chauffage en fonction de la température à l'entrée de la			
PÁCGA Rob	ur pour le modèle GAHP-W LB29			
Figure 3.1	Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS au niveau de			
site de calibra	ation ayant le puits de captage d'eau souterraine W18			
Figure 3.2	Propriétés thermiques des dépôts meubles <i>in situ</i>			
Figure 3.3	Propriétés thermiques des dépôts meubles saturés37			
Figure 3.4	Conductivité thermique des dépôts meubles en condition saturée			
Figure 3.5	Capacité thermique volumique des dépôts meubles en condition saturée38			
Figure 3.6	Propriétés thermiques du roc <i>in situ</i> 40			
Figure 3.7	Propriétés thermiques du roc saturé40			
Figure 3.8	Porosité du roc selon la pression40			
Figure 3.9	Conductivité thermique du roc en condition saturée41			
Figure 3.10	Capacité thermique volumique du roc en condition saturée42			
Figure 3.11	Profils de température du sous-sol à l'endroit du puits W18 pour Kuujjuaq			
et du forage	minier pour la Baie Nipigon (Labrosse, 2019)43			
Figure 3.12	Profils de charges énergétiques du bâtiment de référence45			
Figure 3.13	Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la			
sortie de l'ÉC	CG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon le scénario 248			
Figure 3.14	Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la			
sortie de l'ECG pour une PACGA Robur sur vingt ans selon le scénario 449				

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Données spécifiques du bâtiment type24				
Tableau 2.2	Caractéristiques communes des scénarios de simulation des systèmes				
géothermiques					
Tableau 2.3	Scénarios de simulations des ÉCG verticaux avec une PÀCGÉ				
ClimateMaster.					
Tableau 2.4	Scénarios de simulations des ÉCG verticaux avec une PÀCGA Robur32				
Tableau 3.1	Charges mensuelles de consommation énergétique44				
Tableau 3.2	Température d'opération de systèmes de PÀCGÉ ClimateMaster à la fin de la				
20 <sup>ème</sup> année					
Tableau 3.3	Température d'opération de systèmes de PÀCGA Robur à la fin de la 20 <sup>ème</sup>				
année					
Tableau 3.4	Comparaison des technologies de chauffage en termes d'économie annuelle				
monétaire et d'énergie50					

## Nomenclature

```
b : base de données [-]
C: capacité thermique volumique [MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>]
c: capacité thermique massique [MJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]
CARS : coefficient d'apport de rayonnement solaire des fenêtres [-]
COP : coefficient de performance [-]
D: diffusivité thermique [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]
d : diamètre [m]
DDT : degré de déséquilibre thermique [-]
EEP : efficacité énergétique primaire [-]
g : fonction de réponse thermique [-]
H : quantité totale de chaleur par unité de surface [MJ m^{-2}]
L : longueur [m]
m: débit massique [kg s<sup>-1</sup>]
N: nombre [-]
n: niveau [-]
P: pression [Pa]
Pui: puissance [W]
q : taux de transfert thermique par unité de longueur [W m<sup>-1</sup>]
R: résistance thermique [m K W<sup>-1</sup>]
r: rayon [m]
T: température [°C]
t : temps [s]
U : coefficient de transfert thermique de fenêtrage [W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>]
V: volume [m<sup>3</sup>]
Var: variance [-]
X : épaisseur [m]
```

# **Symboles Grecs**

- $\lambda$  : conductivité thermique [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]
- $\alpha$  : diffusivité thermique [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]
- ρ: résistivité électrique [Ohm m]

 $\phi$  : porosité [%]  $\mu_{:}$  masse volumique [kg m<sup>-3</sup>]  $\sigma$  : Écart type moyen [-]  $\Delta$  : saut et variation [-]

## Indices et exposants

a : apparent ari : arithmétique b : forage bât : bâtiment bl : bulk (global) cons : consommée e : eau ex : externe f: forage gr: grains i : indice in : interne max : maximale min : minimale p : conditions de pression normale para : parallèle perpd : perpendiculaire prod : produite rub : rubber (caoutchouc) s : sous-surface sc : scale (échelle) 1 : premier échantillon 2 : deuxième échantillon

\* : tridimensionnelle

## Abréviations

ACEP: Alaska Center for Energy and Power

CCHRC : Cold Climate Housing Research Center

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

CVCA : chauffage, ventilation et conditionnement d'air

DD : dipôle-dipôle

Dév : déviation

ÉCG : échangeur de chaleur géothermique

EFT : température de fluide à l'entrée de la pompe à chaleur

ERT : tomographie de la résistivité électrique

F : forage

GSHP : ground source heat pump

P : puits

PÀC : pompe à chaleur

PÀCGA : pompe à chaleur géothermique à absorption

PÀCGÉ : pompe à chaleur géothermique électrique

PV : photovoltaïque

RSI : résistance thermique en système métrique international

St : standard

TDEM : time domain electromagnetic

TEC : taux d'extraction de chaleur

TRC : taux de rejet de chaleur

U : tube en forme de U

W : well

WS: Wenner-Schlumberger

## 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les quatorze communautés Inuit du Nunavik (territoire québécois situé au-delà du 55<sup>ème</sup> parallèle et cogéré par les communautés autochtones) sont éloignées et détachées du réseau électrique intégré alimenté par les centrales hydroélectriques du réseau d'Hydro-Québec. Pour cette raison, les villages nordiques sont présentement alimentés en électricité par des centrales thermiques au diesel et, en chauffage, par des fournaises au diesel dans chaque bâtiment (Figure 1.1).



Figure 1.1 Réservoir de diesel pour le chauffage d'un bâtiment à Kuujjuaq.

Le développement de sources énergétiques alternatives renouvelables permettrait aux communautés isolées de créer un nord durable et de faire des économies substantielles. L'énergie géothermique apparaît comme une alternative pour diminuer l'utilisation des combustibles fossiles dispendieux et émetteurs de gaz à effet de serre. En effet, une des technologies qui permettraient d'améliorer la situation est celle des pompes à chaleur (PÀC) géothermique, dont l'hypothèse ici émise est qu'elles pourraient répondre aux besoins de chauffage et eau chaude des bâtiments, même dans un climat subarctique.

## 1.1 Mise en contexte

## 1.1.1 Contexte géographique

La zone d'étude pour ce projet de recherche est le village de Kuujjuaq, (Figure 1.2), soit la capitale des 14 communautés du Nunavik. C'est le village le plus important au nord du 49<sup>ème</sup> parallèle, lequel comptait 2754 habitants en 2016 dont près de 90 % sont des Inuits. La superficie est de 284,5 km<sup>2</sup> et le village est situé à environ 50 km au Sud-Ouest de la baie d'Ungava, sur la rive gauche de la rivière Koksoak (Wikipédia, 2019).



Figure 1.2 Localisation de Kuujjuaq (modifiée selon Comeau et al. 2017).

#### 1.1.2 Contexte climatique

Le village de Kuujjuaq affiche une température de l'air annuelle moyenne de - 5,7 °C (Figure 1.3). En été, la température moyenne est d'environ 11,5 °C, alors qu'en hiver elle est de l'ordre de - 24 °C. Des précipitations sont enregistrées tout au long de l'année à Kuujjuaq, y compris lors des mois les plus secs. Il tombe en moyenne 507 mm par an de précipitations liquides, solides ou un mélange des deux (Environnement Canada, 2004). Le climat de Kuujjuaq est caractérisé par des changements importants de température journalière et mensuelle (Figure 1.4). Il peut arriver dans le même été que la température atmosphérique soit très élevée et que surviennent des chutes de neige. La végétation étant de type toundra, l'absence d'arbres de grande taille rend l'impact des vents importants.



Figure 1.3 Distribution de la température moyenne annuelle de la surface et du sous-sol au Québec (modifiée de Comeau et al. 2017).



Figure 1.4 Normales climatiques à Kuujjuaq (Environnement Canada, 2004).

### 1.1.3 Contexte géologique

Le village de Kuujjuaq est situé sur le Bouclier canadien, plus précisément la Province géologique de Churchill. Cette province, dont l'âge s'étale de 2,9 à 1,1 Ga, couvre une superficie d'environ deux cent mille kilomètres carrés dans la partie septentrionale du Québec, soit au Nord et au Nord-Est de la Province du Supérieure (Gouvernement du Québec, 2016). La Province de Churchill se caractérise par quatre zones géologiques distinctes, soit l'Orogène de l'Ungava, l'Orogène du Nouveau-Québec, la Zone noyau et l'Orogène des Torngat. Kuujjuaq est situé dans la Zone noyau (Simard et al. 2013).

Le socle rocheux au niveau de Kuujjuaq est composé de séries magmatiques plutoniques d'âge Paléoprotérozoïque et de gneiss (Gouvernement du Québec, 2003). Au niveau des roches plutoniques, il s'agit de diorite quartzifère granoblastique à hornblendes et actinotes, très foliée à mylonitiques avec la présence d'intrusions de granite rose massif à biotite et muscovite. La tonalite et le granite blanc de type mobilisat à granulométrie variable sont aussi présents (Simard et al. 2013). Des paragneiss migmatitisés à biotite et d'origine sédimentaire caractérisent la géologie de Kuujjuaq. Deux grandes catégories de roches sont donc identifiées à Kuujjuaq (Figure 1.5) : des roches plutoniques, telles que le gabbro, la tonalite, le granite et la diorite, et des roches métamorphiques d'origine sédimentaire comme le paragneiss.

Les dépôts meubles au-dessus du roc sont des sédiments marins littoraux et pré-littoraux, (Gouvernement du Québec, 2003), des dépôts alluvionnaires de terrasses fluviales anciennes et des tills glaciaires remaniés en couverture continue (L'Hérault, 2013 ; Figure 1.6).

Kuujjuaq se situe en zone de pergélisol discontinu et dont l'épaisseur varie de 10 à 30 m (Figure 1.7 ; Lemieux et al. 2016). Avec le réchauffement climatique prévu, le pergélisol au niveau de Kuujjuaq verra sa superficie réduite. L'épaisseur du mollisol, soit la partie superficielle affectée par des cycles de gel et dégel pendant une année, augmentera et provoquera la fonte de la glace contenue dans les pores du sol ainsi que la glace présente sous forme de lentille subhorizontales et veines verticales. Ce processus entraînera des tassements de la surface du terrain.



Figure 1.5 Carte géologique du roc à Kuujjuaq (Gouvernement du Québec, 2003).



Figure 1.6 Carte des dépôts meubles à Kuujjuaq (Gouvernement du Québec, 2003).



Figure 1.7 Distribution du pergélisol au Québec (modifiée de Lemieux et al. 2016).

### 1.2 Problématique

Au Nunavik, les coûts annuels nécessaires pour produire 12,5 kWh de chaleur avec une fournaise d'une efficacité de 80 % et du diesel payé au coût subventionné de 1,4 \$ L<sup>-1</sup> seraient d'environ 1 645 \$ (Belzile et al. 2017a). Les systèmes de PÀC géothermique permettraient de réduire les coûts annuels de chauffage advenant que l'opération des échangeurs de chaleur géothermique (ÉCG) soit adéquate dans un climat aussi froid. En fait, les conditions climatiques subarctiques de Kuujjuaq, où les charges de chauffage et climatisation sont fortement débalancées, et l'absence de données associées aux propriétés thermiques du roc posent une incertitude sur l'efficacité de tels systèmes géothermiques. Par ailleurs, l'opération d'un système de PÀC géothermique contribuerait de façon générale à garder le sol gelé et serait bénéfique pour la préservation du pergélisol. En effet, avec l'extraction de chaleur du sous-sol pour des fins de chauffage, la température du sous-sol pourrait baisser dans un rayon rapproché des puits géothermiques, généralement moins de 5 à 6 m des ÉCG. Toutefois, si le système est sollicité pour des besoins de climatisation l'été, cela pourrait augmenter la température du sous-sol pour une courte période de temps, d'un mois ou deux au plus, avant de retourner à une période de refroidissement du sous-sol associée au chauffage en hiver. La

demande en chauffage étant plus importante que la demande en climatisation, le bilan thermique annuel au niveau du sous-sol sera négatif. Il est donc crucial de démontrer la faisabilité d'opération des systèmes géothermiques en climat froid en commençant par de simulations basées sur des observations de terrain et des mesures de laboratoire afin d'adapter les technologies géothermiques au milieu nordique pour faciliter l'émergence d'énergies vertes au sein des villages du Nord.

## 1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'avancer le niveau de connaissances qui seraient utiles aux communautés inuites pour réduire leur dépendance énergétique et empreinte carbone. Pour ce faire, nous proposons d'évaluer le potentiel d'opération des PÀC géothermiques dans un climat subarctique au sein d'une communauté isolée et de démontrer quelles sont les économies d'énergie envisageables dans un bâtiment type dans la communauté de Kuujjuaq. Pour y arriver, l'atteinte des objectifs secondaires suivants apparaît nécessaire, soit :

1- Améliorer la compréhension du contexte géologique de la région de Kuujjuaq à l'aide de sondages géophysiques pour mieux étudier les conditions de sous-sol dans lesquelles d'éventuels forages pourront être installés.

2- Évaluer la température et les propriétés thermiques du sous-sol qui auront un impact dominant sur l'opération des systèmes géothermiques par le biais d'analyses en laboratoire dans le but de caractériser le sous-sol et définir un modèle géologique conceptuel sur lequel des simulations de PÀC géothermique pourront être réalisées.

3- Démontrer la faisabilité de l'opération de PÀC géothermique afin de produire de la chaleur pour les bâtiments à l'aide de simulations analytiques de l'opération des systèmes selon les conditions nordiques caractérisées aux points 1 et 2.

## 1.4 Revue de littérature

## 1.4.1 Les ressources et technologies géothermiques superficielles

Le rayonnement solaire, les conditions climatiques actuelles et passées ainsi que le flux de chaleur terrestre influencent la température du sous-sol, de la surface jusqu'à une centaine de mètres de profondeur équivalente à celle des ÉCG. L'inertie thermique du sous-sol exploitée par les PÀC géothermique représente une source d'énergie locale avec un potentiel d'économie d'énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Ces ressources géothermiques, dites superficielles, lorsque comparées aux ressources géothermiques profondes situées à quelques kilomètres de profondeur, peuvent améliorer les bilans

thermiques, économiques et environnementaux du secteur des bâtiments (Minea, 2014). L'utilisation de cette énergie présente en tout point du territoire doit être adaptée en fonction des besoins thermiques des bâtiments et des types de terrains rencontrés.

L'opération d'une PÀC géothermique se fait en trois grandes étapes, soit le captage de la chaleur dans le sous-sol, l'amplification de l'énergie par la PÀC et la distribution de la chaleur dans l'habitation par un circuit de chauffage (Figure 1.8). La conception de tels systèmes a pour but de minimiser la longueur des ÉCG et ainsi le coût d'installation des systèmes, soit les forages pour un système avec échangeurs verticaux. En connaissant les besoins thermiques du bâtiment, la température du fluide à l'entrée de la PÀC peut être calculée au moyen de simulations analytiques ou numériques pour évaluer la performance d'un système et d'en optimiser l'utilisation.



Figure 1.8 Schéma d'un système de PÀC géothermique (modifiée selon Ghyselinck-Bardeau et al. 2007).

La température du sous-sol à partir d'une certaine profondeur (15-20 m) est stable pendant toute l'année et les variations de température atmosphérique sont atténuées. La température augmente ensuite avec la profondeur selon le gradient géothermique dû au flux de chaleur terrestre. Bien que le sous-sol puisse être près du point de congélation en climat subarctique, la température du sous-sol près de la surface demeure plus élevée que celle de l'air en période hivernale et il serait possible de refroidir davantage le sous-sol pour transférer la chaleur vers les bâtiments avec un système de PÀC géothermique. Ce type de systèmes n'a jamais était

utilisé dans le Nord québécois et les conditions d'opération dans un contexte de climat très froid et de pergélisol demeurent inconnues. En effet, le rendement de tels systèmes dépend principalement de la température d'opération des ÉCG, laquelle dépend à son tour de nombreux paramètres dont la conductivité thermique et la température du sous-sol. La distribution spatiale des propriétés thermiques et de la température du sous-sol au niveau des villages du Nunavik demeure également méconnue. Le territoire nordique est vaste et on s'attend à une importante variabilité des propriétés thermiques qui définissent les ressources géothermiques superficielles. Il est évident que les systèmes géothermiques doivent être situés proches des bâtiments, et, donc, naturellement, notre étude s'est attardée aux communautés inuites et plus spécifiquement sa capitale, Kuujjuaq.

#### 1.4.2 Travaux antérieurs en climat froid

L'efficacité énergétique au Nunavik et les technologies d'énergie renouvelable des réseaux isolés au Nord-du-Québec pouvant être utilisées pour des fins de chauffage ont été évaluées par Belzile et al. (2017a). De plus, une évaluation actualisée du potentiel technique des systèmes de PÀC géothermique en climat froid a été présentée par le Cold Climate Housing Research Center (CCHRC) en Alaska (Garber-Slaght et al. 2014). Par ailleurs, des travaux réalisés en Chine par Wu et al. (2013) et You et al. (2016) ont aussi été effectués pour trouver une solution potentielle au déséquilibre thermique des systèmes de PÀC géothermique à absorption (PÀCGA) dans les régions froides.

#### 1.4.2.1 Efficacité énergétique au Nord-du-Québec

La revue technologique préparée par Belzile et al. (2017a) présente certaines alternatives qui pourraient diminuer la consommation de diesel pour le chauffage. D'autres technologies d'efficacité énergétique, telle que l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment qui joue un rôle important dans l'économie d'énergie, sont aussi décrites. Les auteurs mettent en évidence la limite des PÀC géothermique opérées avec un compresseur électrique (PÀCGÉ) versus les PACGA, qui possèdent un compresseur thermique opéré généralement par un combustible fossile. Une PÀCGÉ devrait être approvisionnée de façon autonome en électricité, soit avec une génératrice ou un système de panneaux solaires photovoltaïques et de batteries. Un coefficient de performance (COP) supérieur à 3 peut être attendu pour l'opération de ces systèmes de PÀC lorsque couplés à un ÉCG. À noter que le COP, [1], représente le quotient de la chaleur produite (Puiprod) [W] par celle consommée (Pui<sub>cons</sub>) [W] par PÀC, soit:

$$COP = \frac{Pui_{\text{prod}}}{Pui_{\text{cons}}}$$
[1]

Le faible rendement énergétique d'une génératrice couplée à une PÀCGÉ diminuera les économies d'énergie résultantes alors que des panneaux solaires vont augmenter les coûts d'installation. Une PÀCGA, avec un COP de 1,1 à 1,3 lorsque couplée à un ÉCG, apparait alors comme une solution intermédiaire pour réduire la consommation de diesel. Elle permet d'utiliser une source de chaleur, comme un combustible, pour chauffer plus efficacement un bâtiment. Ce genre de PÀC fonctionne généralement au gaz naturel (Belzile et al. 2017a), mais il a été supposé dans les travaux subséquent de ce mémoire que la PÀCGA pourrait être modifiée pour fonctionner avec du diesel, combustible facilement disponible au Nunavik. La différence majeure entre les PÀCGÉ et PÀCGA est que le réfrigérant n'est pas comprimé par un compresseur, mais absorbé dans un deuxième fluide. L'hypothèse émise est que la combustion du diesel pourrait fournir cette source de chaleur pour chauffer plus efficacement avec la PÁCGA qu'avec une fournaise conventionnelle qui consomme plus de diesel et coûte plus cher (Tableau 3.4). Comme le COP de la PÀCGA est faible, la puissance thermique à prélever au sous-sol par l'intermédiaire de l'ÉCG est de l'ordre de 0,3 à 0,4 fois celle fournie au bâtiment. Belzile et al. (2017a) confirment qu'une PÀCGA offrirait une période de retour sur l'investissement plus rapide qu'un système de PÀCGÉ, bien que la réduction de consommation de diesel serait moins importante. Un inconvénient de la PÀCGA est que le réfrigérant utilisé contient parfois de l'ammoniac qui est toxique et demande des mesures de sécurité au niveau de la salle mécanique des bâtiments, ainsi que du personnel qualifié pour pouvoir opérer le système.

Une étude effectuée par Belzile et al. (2017b) a permis de simuler l'opération de systèmes de PÀC couplé au sol avec un ÉCG horizontal pour chauffer un centre de recherche en climat subarctique à Kangiqsualujjuaq. Les ÉCG horizontaux sont situés dans le mollisol au-dessus du pergélisol (2 m de profondeur) et ont une longueur maximale de 165 m. L'analyse présentée est basée sur des simulations analytiques dans le but d'anticiper la consommation et les économies d'énergie possibles. Une simulation de la consommation énergétique d'un bâtiment de taille résidentielle utilisé comme station de recherche a d'abord été réalisée avec le logiciel EnergyPlus (Crawley et al. 2001). Les points de consigne de chauffage sont à 21 °C le jour et à 15,6 °C la nuit. Les simulations ont été réalisées selon des données météorologiques de Kuujjuaq, car il n'y a pas de station météo d'Environnement Canada à Kangiqsualujjuaq. L'énergie de chauffage requise pour le bâtiment de superficie de 149 m<sup>2</sup> est de 68 100 kWh par an. L'analyse des charges de chauffage montre que 6,2 kW, soit 25 % de la charge de chauffage de pointe, pourraient couvrir 62,2 % de la demande annuelle de chauffage. Une des limites des simulations effectuées est qu'elles n'ont pas pris en compte l'énergie dégagée et absorbée lors des changements de phase de l'eau dans le sol, de sorte que les résultats de la simulation peuvent être considérés comme préliminaires. Différentes technologies ont été comparées, soit un scénario de base avec une fournaise au diesel, une PAC géothermique

10

avec un moteur au diesel avec et sans récupération de chaleur, une PÀCGÉ avec électricité pour le compresseur provenant de panneaux solaires, une PÀCGA et une PÀC à absorption couplée à l'air extérieur. Belzile et al. (2017b) concluent que les propriétés thermiques et la température du sol ont l'impact le plus important sur la taille des échangeurs de chaleur. Le scénario de PÀCGA permet des économies annuelles d'énergie de 4 702 \$ et de 3 358 L de diesel et c'est le plus intéressant pour réduire les coûts opérationnels tout en gardant un coût d'installation acceptable.

### 1.4.2.2 Opération des PÀC géothermique en Alaska

Le CCHRC a effectué l'installation et le suivi de la performance de systèmes de PÀC géothermique en Alaska. En effet, le CCHRC et l'Alaska Center for Energy and Power (ACEP) ont réalisé une étude sur l'état et l'utilisation des PÀC géothermique dans les climats froids (Garber-Slaght et al. 2014). Le rapport d'étude rédigé par Garber-Slaght et al. (2014) contient treize études de cas de différents systèmes de PÀC géothermique et fournit des conseils à l'intention des propriétaires de bâtiments en Alaska qui s'intéressent à ces systèmes en tant qu'option de chauffage. Un cas d'étude traite d'un système de PÀC géothermique avec compresseur électrique couplé à un ÉCG horizontal dont le COP du système était égal à 3,7 alors que le sous-sol avait une température variant de - 0,6 à 1,7 °C. Le système a été installé au centre de recherche et d'essais du CCHRC d'une superficie de 465 m<sup>2</sup>. L'ÉCG horizontal avait une longueur de 183 m. Les études du CCHRC concluent que, même avec des coûts d'investissement élevés, des systèmes géothermiques avec un COP minimum de 2,5 peuvent être rentables en Alaska. À noter que l'effet à long terme de l'extraction de la chaleur sur le sous-sol peut causer une diminution de sa température et conséquemment de l'efficacité du système de PÀC (Wu et al. 2013). Ces derniers auteurs soulignent qu'il existe plusieurs approches pour résoudre ce problème, comme l'augmentation de la longueur des ÉCG, l'installation d'une source de chauffage secondaire et l'utilisation du stockage thermique. Le CCHRC conclut que seuls 12 des 29 systèmes ont utilisé leur système de chauffage auxiliaire (Garber-Slaght et al. 2014). À noter que la température atmosphérique n'a jamais été mesurée en dessous de - 18 °C dans le sud-est de l'Alaska entre 2014-2015 lors de la période de suivi des systèmes, alors que cela peut parfois arriver. Les études du CCHRC mettent en lumière une autre considération technique, soit la possibilité de réparer rapidement une unité brisée. Les systèmes de chauffage fonctionnant au diesel sont situés à l'intérieur de bâtiments, ce qui offre la possibilité de les réparer sans égards aux conditions météorologiques. De la même façon, les composantes principales d'une PAC géothermique sont situées aussi à l'intérieur et une réparation rapide d'un appareil en panne peut être effectuée même en conditions météorologiques difficiles.

11

### 1.4.2.3 Potentiel des PÀC géothermique en Chine

Les travaux effectués en Chine par Wu et al. (2013) et You et al. (2016) avaient pour but de comprendre et résoudre le problème, particulièrement évident dans les régions froides, où la chaleur extraite du sous-sol par la PÀC géothermique en hiver est bien supérieure à celle rejetée au sous-sol en été. Ces études ont été réalisées sur des modèles de PÀCGÉ et PÁCGA dans des villes chinoises types et analysées de manière comparative sur la base du bilan thermique, la variation de la température du sous-sol et l'efficacité énergétique. Les chercheurs ont constaté que la température moyenne du sol avec la PÀCGÉ diminue clairement pendant 10 ans à cause des charges de chauffage et de climatisation débalancées. Cinq scénarios de simulations de bâtiment ont été réalisés pour différentes villes au nord de la Chine afin de comparer la différence du déséquilibre thermique entre les systèmes de PÀC géothermique. Il s'agit d'un climat froid pour la Chine, mais quand même plus chaud que celui du Nunavik. En effet, la température moyenne d'air est de l'ordre de 8,6 ; 5,5 et 4,1 °C pour les villes de Shenyang, Changchun et Harbin, respectivement, en comparaison avec celle de - 5,7 °C à Kuujjuaq. Les charges de chauffage des bâtiments types de superficie d'environ 5000 m<sup>2</sup>, ont été calculées en se basant sur l'outil de simulation d'énergie dynamique DeST (Yan et al. 2008 ; Zhang et al. 2008). Des charges de chauffage de l'ordre de 271, 277 et 312 kW pour le scénario 4, ainsi que 271, 277 et 312 kW pour le scénario 5, ont été considérés pour les villes de Shenyang, Changchun et Harbin, respectivement. De plus, une estimation du degré de déséquilibre thermique (DDT) des systèmes géothermiques a été faite. Un DDT calculé est de l'ordre de - 46,6 ; - 78,4 et - 78,8 % pour Shenyang, Changchun et Harbin, respectivement. À noter qu'un DDT représente le rapport de déséquilibre thermique déterminé par la chaleur rejetée dans le sol en été et la chaleur extraite du sol en hiver, qui peut être obtenu à partir des charges du bâtiment et des performances de la PÀC géothermique. Afin d'étudier l'efficacité énergétique de deux types de PÀC, PÀCGÉ et PÀCGA, utilisant différents types d'énergie, un calcul des valeurs annuelles de l'efficacité énergétique primaire (EEP) a été réalisé. Les travaux ont conclu que lorsque comparée à la PÀCGÉ, la PÀCGA extrait moins de chaleur du sous-sol et en rejette plus, ce qui peut réduire le déséquilibre thermique du sol dans les régions froides. Ce genre de PÀC géothermique maintient un bilan thermique adéquat dans les villes très froides, sans diminution évidente de la température du sol après 10 ans, et que leur rendement énergétique primaire de 0,96 est nettement supérieure. Pour les bâtiments ayant des besoins de chauffage et de climatisation, l'équilibre thermique est maintenu avec la PÀCGA dans les villes froides comme Shenyang, Changchun et Harbin, mais celles-ci ne sont décidément pas aussi froides que Kuujjuaq. La température du sous-sol n'a pas beaucoup changé après 10 ans d'opération. Pour les bâtiments avec un chauffage

uniquement, la température moyenne du sous-sol pour un système de PÀCGA peut être de 4 à 6 °C supérieure à celle d'une PÀCGÉ.

## 2 MÉTHODOLOGIE

## 2.1 Approche géophysique

### 2.1.1 Tomographie de la résistivité électrique

Dans le cadre de ce projet de recherche, des travaux de caractérisation du sous-sol, reposant sur la mesure de la résistivité électrique ( $\rho$ ), ont été réalisés. La méthode de tomographie de résistivité électrique (ERT) a été utilisée dans le but d'évaluer la présence du pergélisol et la profondeur du socle rocheux à Kuujjuaq. L'injection du courant à une intensité connue avec une mesure de la distribution du potentiel électrique permet d'estimer la résistivité apparente  $(\rho_a)$  du sous-sol (Jouen et al. 2016 ; Wubda et al. 2017). La loi d'Ohm lie l'intensité du courant électrique traversant un dipôle électrique à la tension entre ses bornes et permet d'estimer la résistivité électrique apparente. Cette valeur résulte de la contribution de toutes les portions du milieu qui sont traversées par le courant émis en surface. La résistivité électrique du sous-sol dépend essentiellement de la teneur en eau de la roche ou des dépôts meubles, fonction de la porosité et la saturation, de la salinité de l'eau interstitielle et de la teneur en argile des matériaux. La technique d'acquisition consiste à réaliser des profils en augmentant régulièrement l'espace entre les électrodes. Les mesures de terrain permettent ainsi d'obtenir une pseudo-section de la résistivité électrique apparente du sous-sol. Sur chaque ligne d'ERT de 80 électrodes espacées de 2 ou 3 m, au moins 3 acquisitions différentes ont été réalisées. Deux protocoles d'acquisition Wenner-Schlumberger (WS) et dipôle-dipôle (DD) ont été réalisés avec un temps d'injection de 500 ms. Le sous-sol sondé étant résistif, la source de courant appliquée aux électrodes de courant a toujours été maintenue aussi basse que possible lors des acquisitions de résistivité. La technique d'ERT a été utilisée sur quatre sites différents à Kuujjuag pour un total de 6 lignes (Figure 2.1) : sur le chemin du lac Stewart, utilisé comme un site de calibration ayant un puits de captage d'eau souterraine dont la stratigraphie est connue (W18); près de la station de pompage sur la rive du lac Stewart (deux lignes); à côté des serres (deux lignes croisées) ; et près du site de construction d'une usine de traitement d'eau potable.



Figure 2.1 Localisation des sondages ERT effectués à Kuujjuaq.

Pour obtenir la distribution de résistivité « réelle » du sous-sol, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes d'inversion. Nous avons utilisé le code d'inversion R2 version 3.2 (Binley, 2015), déterminer la distribution spatiale de la résistivité électrique pour à partir des pseudo-sections. Les paramètres de l'inversion ont été choisis par essai erreur en fonction de la plausibilité des structures géologiques inversées. Les données ont d'abord été analysées avec certains seuils de rejet, par exemple un écart-type de 10 % de répétabilité, puis un lissage latéral des données a été fait en fonction de la distribution de résistivité pour éliminer les valeurs aberrantes. Avec cette procédure, environ 82 à 86 % des données ont été utilisées pour les inversions. Dans certains endroits comme les serres par contre, le filtrage a enlevé de 25 à 35 % des valeurs de résistivités apparentes, mettant en évidence un environnement résistif et plus sensible au bruit. L'acquisition DD présentait toujours 3 à 9 % moins de données répondant aux critères sélectionnés, montrant, comme attendu, un rapport signal/bruit plus faible comparativement à l'acquisition en mode WS. Plusieurs ouvrages soulignent l'importance d'utiliser des mesures réciproques pour obtenir une estimation d'erreur fiable (Labrecque et al. 1996; Slater et al. 2000; Binley et al. 2005; Hermans et al. 2012 et Binley, 2015). Des réciproques n'ont toutefois pas été acquises à cause de la logistique de terrain et du temps d'acquisition (6-7 h, comprenant des acquisitions de polarisation provoquée non décrites et montrées ici). Pour y remédier, plusieurs inversions ont été effectuées en modifiant le raffinement du maillage, l'estimation de l'erreur ( $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) et l'erreur finale ciblée afin d'obtenir des sections fiables de résistivité pouvant être utilisées comme modèle géophysique valide pour en déduire un profil géologique. Les inversions géophysiques ont été effectuées sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel® Xeo® E5-1620 à 3,5 GHz avec 32 Go de RAM. Avec la configuration WS, on peut couvrir relativement une grande surface et obtenir un sondage de la résistivité en profondeur sous le centre du dispositif, alors que le dispositif DD est avantageux, car il est sensible aux variations latérales de la résistivité. Chaque type de configuration a ses avantages et inconvénients. La variance *Var* [2], de l'ensemble de la base de données  $b_i$  (Labrecque et al. 1996), est décrite selon :

$$Var(b_{i}) = \sigma_{1}^{2} + \sigma_{2}^{2}(b_{i})^{2}$$
[2]

Une première inversion a toujours été exécutée avec  $\sigma_1$  égal à l'écart type moyen ( $\sigma$ ) des mesures de répétabilité et  $\sigma_2$  égal à 0,02 lorsque les valeurs de résistance après filtrage présentaient une distribution d'erreur gaussienne avec  $\sigma < 2-3$  %. Lorsque les erreurs de l'ensemble de données différaient clairement d'une distribution normale,  $\sigma_1$  était égal à  $\sigma$  des données de faible erreur et  $\sigma_2$  égal au rapport entre la moyenne  $\sigma$  et la moyenne des valeurs de données, comme suggérées par Labrecque et al. (1996). Des inversions ont également été effectuées en tenant compte de l'écart type à chaque mesure quadripolaire afin d'évaluer le niveau de bruit le long de la ligne d'électrodes.

### 2.2 Échantillonnage

La caractérisation des propriétés thermiques du sous-sol a été réalisée en guise d'évaluation préliminaire du potentiel géothermique en s'appuyant sur l'échantillonnage de dépôts meubles et des roches provenant d'affleurements au niveau du village de Kuujjuaq lors d'une première campagne de terrain effectuée à l'été 2017 durant trois semaines.

### Dépôts meubles

Un total de 20 échantillons représentatifs des différents types de dépôts sédimentaires quaternaires présents à Kuujjuaq ont été ramassés (Figure 2.2). L'épaisseur des dépôts meubles a été évaluée à partir des données de puits forés. En effet, divers puits ont été inventoriés à Kuujjuaq, dont dix-neuf puits de captage d'eau souterraine, cinq puits géotechniques pour le projet d'usine d'eau potable et onze autres puits recensés (Division Lab Journeaux INC., 2016). Le puits W18 montre la plus grande profondeur de forage, environ 81 m. L'épaisseur de dépôts meubles est d'environ 24 m.



Figure 2.2 Localisation des échantillons de dépôts meubles prélevés à Kuujjuaq.

Trois grandes catégories de dépôts meubles ont été identifiées (Figure 2.3) : les dépôts alluvionnaires, les dépôts marins et les tills.



Figure 2.3 Échantillonnage de till.

### • Roc

Vingt-quatre échantillons de roches issus des différentes formations géologiques ont été recueillis sur l'ensemble du territoire de Kuujjuaq (Figure 2.4). Deux grandes catégories de lithologies ont été identifiées au niveau de la zone d'étude, soit les roches d'origine plutonique et les roches d'origine sédimentaire. Toutes ces roches ont subi un métamorphisme important, mais les paragneiss d'origine sédimentaire se distinguent par la présence de micas et leur texture lorsque comparés aux roches d'origines plutoniques.



Figure 2.4 Localisation des échantillons de roches prélevés à Kuujjuaq.

## 2.3 Évaluation en laboratoire des propriétés thermiques

### 2.3.1 Principe de base

Une évaluation des propriétés thermiques des échantillons de dépôts meubles a été effectuée en laboratoire. Les propriétés ciblées sont la conductivité thermique et la capacité thermique volumique. Les valeurs de propriétés thermiques obtenues ont ensuite été regroupées pour définir des unités thermostratigraphiques, dont les propriétés sont semblables. Des mesures en conditions *in situ* et saturées de la conductivité et la capacité thermique volumique des

échantillons de dépôts meubles ont été réalisées de façon transitoire à l'aide d'une sonde à double aiguille SH-1 de l'analyseur de propriétés thermiques KD2Pro (Decagon Devices, Inc., 2007). La sonde offre une exactitude de  $\pm$  10 % pour la conductivité et la diffusivité thermique à partir desquels la capacité thermique volumique est calculée, avec une exactitude similaire selon le rapport des deux propriétés (Raymond et al. 2017). La conductivité et la capacité thermique des échantillons de roc ont été évaluées en régime permanent, toujours en conditions *in situ* et saturées, en utilisant un compteur de flux de chaleur Laser comp FOX-50, instrument facile à utiliser et avec une exactitude de  $\pm$  5 % (TA Instruments, 2015). Toutes les mesures ont été effectuées à une température ambiante d'environ 20 °C.

Les échantillons de roc ont aussi été soumis à des tests de pression avec un porosimètre au gaz. En effet, des mesures de porosité ont été effectuées en utilisant deux méthodes, soit à la pression atmosphérique à l'aide de la chambre à grains (Coretest Systems, Inc., 2016) et en conditions pressurisées en utilisant le porosimètre au gaz avec une exactitude de 0,1 % pour la porosité (Coretest Systems, Inc. AP-608, 2017). Des histogrammes et des cartes représentatives de propriétés thermiques et hydrauliques des échantillons ont finalement été préparés à partir des résultats de laboratoire.

### 2.3.1.1 Dépôts meubles

#### 2.3.1.1.1 Conductivité thermique

La méthode de la sonde à aiguille a été utilisée afin d'estimer la conductivité thermique des matériaux meubles. Cette technique consiste à introduire une aiguille chauffante dans l'échantillon de dépôts meubles et envoie une impulsion de chaleur (Figure 2.5). Il y a donc un transfert thermique entre l'aiguille chauffante et l'échantillon. La deuxième aiguille est utilisée pour mesurer la température à une distance définie de l'aiguille source de chaleur qui mesure aussi la température. L'augmentation de la température à l'aiguille chauffante sur une échelle de temps logarithmique est proportionnelle à la conductivité thermique.



Figure 2.5 Mesure des propriétés thermiques de dépôts meubles avec une sonde à double aiguille de Decagon dont le modèle est KD2Pro.

#### 2.3.1.1.2 Capacité thermique volumique

La capacité thermique peut aussi être mesurée avec la sonde à aiguille. En effet, la transmission de la chaleur mesurée avec le capteur de température de la seconde aiguille permet d'évaluer la diffusivité thermique et d'estimer la capacité thermique volumique, [3], selon le rapport :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu c}$$
[3]

où  $\alpha$  [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>],  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],  $\mu$  [kg m<sup>-3</sup>] et *c* [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] sont la diffusivité, la conductivité, la masse volumique et la capacité thermique massique des dépôts meubles, respectivement. La masse volumique n'étant pas proprement mesurée, les valeurs obtenues sont exprimées en termes de capacité thermique volumique.

#### 2.3.1.2 Roc

Les roches récoltées sur le terrain à Kuujjuaq ont été coupées pour avoir des échantillons cylindriques dont les dimensions sont 25 mm d'épaisseur et de diamètre montrant une planéité et un parallélisme entre 0,03 et 0,1 mm. La coupe des roches a été faite soit parallèlement ou perpendiculairement à la foliation des échantillons. Les surfaces supérieures et inférieures des échantillons ont été polies pour en faire des surfaces parallèles afin d'assurer un bon contact thermique lors des mesures.

### Saturation des échantillons de roc

Les échantillons de roc ont été saturés avec une chambre à vide pour extraire l'air contenu dans les pores à l'aide d'une pompe à vide permettant d'en diminuer la pression (Figure 2.6). Les échantillons ont été saturés avec de l'eau distillée pour une période d'au moins douze à vingt-quatre heures. Après saturation, les échantillons ont été pesés pour comparer leurs masses sèches et saturées, puis enveloppés par un parafilm sur les parois latérales pour empêcher la fuite d'eau. De la glycérine a finalement été appliquée sur ses deux surfaces parallèles pour assurer un bon contact thermique.



Figure 2.6 Mesure de propriétés thermiques du roc avec un compteur de flux de chaleur Laser comp dont le modèle est FOX-50 et saturation des échantillons avec de l'eau distillée.

## 2.3.1.2.1 Conductivité thermique

Un transfert thermique vertical est établi avec le compteur de flux de chaleur, provoqué de la source chaude à la source froide, pour évaluer la conductivité thermique de tout l'échantillon lorsqu'il atteint un équilibre thermique. La différence de température maintenue entre les deux plaques chaude et froide était de 10 °C, soit 25 °C pour la température de la plaque chaude et 15 °C pour la plaque froide.

### 2.3.1.2.2 Capacité thermique volumique

Le système FOX-50 permet aussi de mesurer la capacité thermique volumique, dans les conditions *in situ* et saturées, des échantillons de roches. En effet, l'instrument permet de réchauffer l'échantillon de façon uniforme jusqu'à un point d'équilibre thermique soit atteint. La température de la plaque chauffante est changée instantanément et le temps requis pour atteindre de nouveau l'équilibre thermique permet de calculer la capacité thermique. Le logiciel WinTherm32 calcule la quantité totale de chaleur par unité de surface *H* [MJ m<sup>-2</sup>] absorbée durant la période de retour à l'équilibre par l'échantillon. La valeur exacte de la capacité thermique volumique *C* [MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>] de l'échantillon est calculée en soustrayant la quantité de chaleur absorbée par les feuilles de caoutchouc d'épaisseur connue qui bordent l'échantillon *X* [m] (TA Instruments, 2016) :

$$C = \frac{(H - H_{\rm rub})}{[(X - X_{\rm rub})\Delta T]}$$
<sup>[4]</sup>

où  $\Delta T$  [°C] est le saut de température.

#### 2.3.1.2.3 Porosité

Les mesures de porosité à la pression atmosphérique débutent par l'évaluation de l'épaisseur, le diamètre et le poids de l'échantillon sont mesurés avec un pied à coulisse et une balance. L'échantillon est introduit dans la chambre d'un volume connu et des rondelles sont ajoutées pour combler le volume de vide restant. La chambre à grains est connectée au logiciel AP-608 pour permettre un calcul du volume de grains de l'échantillon  $V_{gr}$  [m<sup>3</sup>] selon des mesures de pression. Ce volume de grains est calculé à partir de données entrées au logiciel telles que l'épaisseur, le diamètre et le poids de l'échantillon de roche pour avoir une idée sur le volume total de l'échantillon  $V_{bl}$  [m<sup>3</sup>]. Les mesures de volume de grains sont basées sur l'expansion d'hélium et la loi de Boyle-Mariotte (Coretest Systems, Inc., 2016). C'est la loi qui stipule que la pression *P* [Pa] de tout gaz idéal multipliée par son volume *V* [m<sup>3</sup>] donnera une valeur constante à une température constante. La loi de Boyle, en relation avec l'analyse de l'échantillon, fait référence à la capacité de déterminer un volume inconnu par détente de gaz à condition de pression résultante pour calculer le volume inconnu. Par conséquent, en connaissant  $P_1$ ,  $P_2$  et  $V_2$ ,  $V_1$  peut être calculé :

$$V_1 = \frac{(P_2 \times V_2)}{P_1}$$
[5]

Le volume total de l'échantillon est utilisé pour calculer la densité de grains de l'échantillon qui est donnée par la division du poids sec de l'échantillon par le volume de grain. Cette densité de grains sert à calculer le volume de grains et en déduire la porosité  $\emptyset$  (%) [6].

$$\emptyset (\%) = \left(\frac{V_{\rm bl} - V_{\rm gr}}{V_{\rm bl}}\right) \times 100$$
[6]

En conditions pressurisées, la porosité est estimée à l'aide du porosimètre au gaz en utilisant une procédure semblable (Figure 2.7). Une pression de confinement de l'ordre de 34,5×10<sup>5</sup> à environ 80×10<sup>5</sup> Pa pour une profondeur allant jusqu'à 300 m est d'abord imposée avec de l'hélium pour reproduire les conditions au niveau du sous-sol. Un volume de gaz additionnel à une pression connue est ensuite injecté pour déterminer la pression d'équilibre une fois le gaz injecté.



Figure 2.7 Mesure de la porosité de roches avec le porosimètre au gaz de Coretest AP-608.

### 2.4 Simulations analytiques de bâtiment et sous-sol

### • Principe de base

Dans le cadre de ce projet, des simulations analytiques ont été réalisées pour concevoir des systèmes de PÀC géothermique et évaluer les économies d'énergie potentielles pour un bâtiment type à Kuujjuaq. Une simulation des besoins énergétiques d'un bâtiment de référence a d'abord été réalisée avec le logiciel SIMEB (Sansregret, 2012), pour estimer la consommation énergétique en fonction des caractéristiques du bâtiment, de son utilisation et du climat. Lors d'une deuxième étape, des simulations analytiques ont été faites avec le logiciel GLHEPro (School of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University, 2016). Le but était d'anticiper les conditions d'opération des systèmes de PÀC, d'évaluer la température des échangeurs de chaleur verticaux et de déterminer les économies d'énergie possibles pouvant être générées par les systèmes installés pour le bâtiment type.

### 2.4.1 Simulation énergétique d'un bâtiment type

### 2.4.1.1 Description du bâtiment de référence

Le bâtiment de référence est un centre communautaire et clinique pédiatrique qui pourrait être construit à Kuujjuaq (Figure 2.8). Le projet de bâtiment a été proposé en accord avec les besoins du centre de la santé Tulattavik de l'Ungava et de la communauté inuite de Kuujjuaq (Lévesque, 2015).



Figure 2.8 Bâtiment de référence (Lévesque, 2015).

La superficie du bâtiment est d'environ 296 m<sup>2</sup>. Il s'agit d'un ancien magasin qui sera réaménagé. En effet, le rez-de-chaussée accueillera un centre communautaire et une clinique de pédiatrie sociale, une salle de jeux, sept nouveaux bureaux, des salles de rencontres et d'échanges, des espaces de rangement, ainsi que plusieurs autres services. Ces nouveaux espaces permettraient à la communauté de se rencontrer et d'interagir en un lieu où plusieurs intervenants du centre de santé seront présents en permanence. De nouvelles fenêtres perceraient les façades existantes afin de laisser pénétrer davantage la lumière dans les espaces plus fermés. Ainsi, l'intérieur du bâtiment se composera d'espaces lumineux, conviviaux et harmonieux pour les usagers. Les simulations énergétiques du bâtiment ont été réalisées en se basant sur ces caractéristiques spécifiques envisagées (Tableau 2.1).

Paramètre	
Superficie [m <sup>2</sup> ]	
Azimut du bâtiment nord-est [degrés]	45,0
Pression statique de ventilation [kPa]	0,1
Densité d'éclairage [W m <sup>-2</sup> ]	9,4
Nombre d'occupants	20,0
Densité d'occupation [m <sup>2</sup> par occupant]	15,0
Chaleur sensible [W par occupant]	67,1
Chaleur latente [W par occupant]	
Air neuf [l s <sup>-1</sup> par occupant]	38,0
Coefficient de transfert thermique de fenêtrage ( <i>U</i> ) [W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ]	1,0
Coefficient d'apport de rayonnement solaire de fenêtrage (CARS)	0,5
---	---------
Infiltration des murs extérieurs [l s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]	2,1
Puissance d'éclairage extérieur [W]	1 000,0
Charge maximale d'eau chaude sanitaire [W m <sup>-2</sup> ]	6,6
Résistance thermique du toit (RSI) [m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> ]	9,0
Résistance thermique des murs (RSI) [m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> ]	3,0
Température minimale en point de consigne <i>T</i> <sub>min</sub> [°C]	21,1
où RSI : Résistance thermique en système métrique international	

#### 2.4.1.2 Simulations horaires SIMEB

Les simulations horaires ont été effectuées pour une période d'une année en afin d'établir le bilan thermique du bâtiment en se basant sur des données météorologiques de la zone d'étude de Kuujjuaq (Gouvernement du Canada, 2019). SIMEB est un outil gratuit pour la simulation énergétique des bâtiments qui offre une interface graphique pour les moteurs de calcul DOE-2.2 (York et al. 1981) et EnergyPlus (Crawley et al. 2001). Le moteur de calcul DOE-2.2 a été retenu pour les calculs, mais quelques vérifications ont été faites sur EnergyPlus. Les deux simulateurs ont révélé des résultats semblables. De plus, Hydro-Québec a utilisé DOE-2.2 pour son étude dans le but de concevoir un programme d'efficacité énergétique avec des objectifs ambitieux en termes d'économie d'énergie pour un bâtiment type (Millette et al. 2011). Les données spécifiques du bâtiment type à modéliser ont été entrées dans SIMEB (Tableau 2.1), en plus des données météo de Kuujjuaq. Le point de consigne des zones a été défini comme étant de 15 °C la nuit et 21 °C le jour pour les zones de bureau et 21 °C toute la journée pour les toilettes. Selon les exigences principales du Code national du bâtiment (Régie du bâtiment du Québec, 2012), un facteur d'isolation (R) égale à 9 RSI pour la toiture et 3 RSI pour les murs extérieurs a été utilisé pour les simulations puisque le nombre de degrés-jours sous 18 °C à Kuujjuaq est de 8 405. Cette résistance thermique caractérise la capacité d'un matériel à empêcher le transfert de chaleur qui le traverse et est établie selon l'épaisseur et la conductivité thermique du matériel. Les fenêtres sont quant à elles caractérisées par un coefficient de transfert thermique, soit l'inverse de la résistance thermique, quantifiant le flux d'énergie traversant les fenêtres et un coefficient d'apport de rayonnement solaire. Chaque occupant apporte une chaleur sensible par son corps et une chaleur latente par sa production de vapeur d'eau en respiration et transpiration avec considération de l'entrée d'air neuf. Des systèmes de chauffage et de ventilation avec un COP égal à 1 ont été considérés pour déterminer les charges de chauffage et de climatisation du bâtiment. Les charges de chauffage correspondent aux pertes de chaleur par les éléments de l'enveloppe, ainsi que les infiltrations naturelles. Les charges de ventilation correspondent à la demande de chauffage de la

ventilation mécanique provenant d'un échangeur d'air avec une pression statique de 0,12 kPa. L'échangeur d'air est muni de récupérateur de chaleur d'une efficacité de 70 %. Le système serait plus rentable si seulement une fraction de la charge thermique du bâtiment était satisfaite par la géothermie.

### 2.4.2 Simulations énergétiques de systèmes de PÀC géothermique

Des simulations de la réponse thermique des ÉCG ont été effectuées pour une période de vingt ans dans le but de calculer la température du fluide à l'entrée des PÀC pour évaluer les économies d'énergies générées par le système géothermique. Le calcul des coûts de pompage dans les ÉCG n'est pas inclus dans l'analyse. Ces simulations ont été effectuées à l'aide de GLHEPro (School of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University, 2016), qui utilise une approche analytique pour calculer la température du fluide caloporteur des ÉCG selon une fonction de réponse thermique (g) déterminée de façon numérique. La fonction g dépend des dimensions et de l'espacement des forages et est utilisée pour calculer la température à la paroi du forage des ÉCG en se basant sur les caractéristiques thermiques du sous-sol. La résistance thermique du forage permet de faire le lien entre la température de la paroi du forage et la température du fluide caloporteur de l'ÉCG. Cette résistance dépend des dimensions du forage et des tuyaux de l'ÉCG, des propriétés thermiques du coulis, des tuyaux et du fluide caloporteur. De l'eau avec une concentration de 25 % de propylène glycol a été choisie comme fluide caloporteur pour s'assurer d'un point de congélation bas de - 14 °C. Le débit de circulation du fluide a été ajusté pour assurer un nombre de Reynolds supérieur à 2000 caractéristique d'un régime turbulent afin de faciliter le transfert de la chaleur. Le calcul de la résistance thermique de forage  $(R_f)$  [m K W<sup>-1</sup>] avec le programme GLHEPro implique une approche bidimensionnelle et la méthode des multipoles (Bennet et al. 1987). C'est une résistance qui comporte trois éléments, la résistance de convection entre le fluide caloporteur circulant dans le tube en U et la paroi du trou de forage, la résistance de conduction provoquée par le matériel du tube en U et la résistance provoquée par le coulis. La réponse dynamique à court terme due à l'emmagasinement de chaleur dans le forage est aussi considérée. Les calculs effectués supposent également que la température à la paroi du forage des ÉCG est uniforme. La température moyenne de l'eau  $(\overline{T}_e)$  [°C ; 7], à l'intérieur des ÉCGs est calculée avec GLHEPRO (School of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University, 2016) selon la formule :

$$\bar{T}_{\rm e} = T_{\rm s} - qR_{\rm f}^* - \frac{q}{2\pi\lambda} g(\frac{t}{t_{\rm sc}}, \frac{r_{\rm f}}{L})$$
<sup>[7]</sup>

où  $T_{\rm s}$  [°C] est la température non perturbée du sous-sol, q [W m<sup>-1</sup>] est le taux de transfert thermique par unité de longueur de l'échangeur de chaleur géothermique,  $R_{\rm f}^*$  [m K W<sup>-1</sup>] est la résistance thermique effective tridimensionnelle de forage [8],  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] est la conductivité thermique du sous-sol,  $t_{\rm sc}$  [s] ( $t_{\rm sc} = \frac{L^2}{9\alpha_{\rm s}}$ ) est l'échelle de temps, L [m] est la longueur de forage,  $\alpha_{\rm s}$  [m<sup>2</sup> s] est la diffusivité thermique du sous-sol et  $r_{\rm f}$  [m] est le rayon de forage. La résistance thermique tridimensionnelle du forage dépend de :

$$R_{\rm f}^* = R_{\rm f} \left(1 + \frac{L^2}{3(\dot{m}_{\rm e}c_{\rm e})^2 R_{\rm in}R_{\rm ex}}\right)$$
[8]

où  $\dot{m}_{\rm e}$  [kg s<sup>-1</sup>] est le débit massique d'eau circulant à l'intérieur de l'ÉCG,  $c_{\rm e}$  [MJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] est la capacité thermique massique de l'eau,  $R_{\rm in}$  [m K W<sup>-1</sup>] est la résistance interne bidimensionnelle déterminée par le débit d'eau dans le tuyau intérieur ainsi que par sa conductivité thermique et ses dimensions, et  $R_{\rm ex}$  [m K W<sup>-1</sup>] est la résistance externe bidimensionnelle déterminée à partir du débit d'eau dans le tuyau extérieur, sa conductivité thermique et ses dimensions ainsi que le coulis.

Les résultats obtenus des simulations d'ÉCG avec GLHEPro sont la température moyenne, d'entrée et de sortie de fluide caloporteur des ÉCG qui servent à déterminer la consommation énergétique des PÀC géothermique et les charges au niveau du sous-sol. Pour y arriver, il faut spécifier les courbes de performances des PÀC géothermique sélectionnées, soit le *COP* en fonction de la température du fluide caloporteur et indiquer les charges de chauffage et de climatisation du bâtiment qui servent finalement à déterminer les taux de transfert thermique au niveau du sous-sol.

#### Charges imposées au sous-sol

En se basant sur les charges horaires de bâtiment évaluées avec la simulation énergétique SIMEB et le *COP* des PÀC géothermique déterminé selon la température du fluide caloporteur, le logiciel GLHEPro permet de calculer les charges imposées au sous-sol en mode chauffage et climatisation, soit ( $Q_{s,ch}$ ) et ( $Q_{s,cl}$ ) [W ; 9 et 10], respectivement :

$$Q_{\rm s,ch} = Q_{\rm b\hat{a}t} \left(\frac{COP_{\rm ch} - 1}{COP_{\rm ch}}\right)$$
[9]

$$Q_{\rm s,cl} = Q_{\rm bât} \left(\frac{COP_{\rm cl}+1}{COP_{\rm cl}}\right)$$
[10]

où  $Q_{b\hat{a}t}$  [W] représente les charges du bâtiment. Ces charges servent en retour à déterminer la température du fluide caloporteur selon la réponse thermique des ÉCG. Le calcul est ainsi

réalisé de façon itérative. De plus, il a été supposé que 100 % des charges de chauffage et de climatisation du bâtiment étaient imposées au sous-sol.

### 2.4.2.1 Pompe à chaleur géothermique électrique

Les simulations avec PÀC dont le compresseur est électrique, (Figure 2.9), ont été réalisées en se basant sur les courbes de performance d'un modèle de ClimateMaster (2016), soit TCH/V072 (Figure 2.10).



Figure 2.9 Diagramme schématique du fonctionnement d'une PÀCGÉ (ADEME et BRGM, 2019).



Figure 2.10 Variation du *COP* en chauffage en fonction de la température à l'entrée de la PÀCGÉ ClimateMaster pour le modèle TCH/V072.

À Kuujjuaq, l'énergie électrique nécessaire pour la PÀC est supposée fournie par des panneaux solaires de façon autonome, car il n'est pas possible d'utiliser l'énergie du réseau électrique pour le chauffage. Ce cas sert de référence même si ce n'est pas nécessairement une solution applicable directement dans ce contexte.

#### 2.4.2.2 Pompe à chaleur géothermique à absorption

Les simulations considérant une PÀCGA, (Figure 2.11), ont été effectuées en se basant sur les courbes de performance d'un modèle de Robur Corporation (2019), soit GAHP-W LB. Ce type de PÀC utilise un cycle d'absorption eau-ammoniac conçu pour l'intérieure. La température de fluide à l'entrée de la PÀCGA (EFT) et les valeurs de COP spécifiées pour les simulations sont inspirées des valeurs d'un produit actuel disponible sur le marché ayant le plus petit EFT minimal trouvé (-20,6 °C). Le COP varie en fonction d'EFT (Figure 2.12). La capacité de la PÀCGA n'est jamais dépassée, donc aucun prétraitement sur les charges n'est requis.



Figure 2.11 Diagramme schématique du fonctionnement d'une PÀCGA (modifiée selon CEGIBAT, 2019).



Figure 2.12 Variation du COP en chauffage en fonction de la température à l'entrée de la PÀCGA Robur pour le modèle GAHP-W LB.

#### 2.4.2.3 Conception des échangeurs de chaleur et du champ de forages géothermiques

La conception des échangeurs de chaleur consiste à déterminer la longueur totale de forage ainsi que la disposition et l'espacement des ÉGC. Les propriétés thermiques du sous-sol, des matériaux de remplissage et du fluide caloporteur sont importantes pour minimiser la longueur totale de forage requise pour le système de PÀC géothermique. Le tout doit être fait considérant les besoins énergétiques du bâtiment et les technologies de forage qui seraient réalistement disponibles sur place. La température du fluide caloporteur de l'ÉCG est ensuite simulée sur une période de 20 ans pour vérifier si la température minimale anticipée est maintenue avec la longueur de forage envisagée. Si la longueur de forage est trop élevée, les coûts du système résultant peuvent être onéreux. Si la longueur de forage est trop courte, les performances du système seront inférieures aux attentes, les économies d'énergie diminuées et le fluide caloporteur pourrait même geler en climat subarctique. Les résultats de simulation permettent de quantifier l'impact des charges de chauffage non balancées et d'évaluer les économies d'énergies générées par la PÀC géothermique au fil du temps. L'espacement supposé entre les forages a été de 6 m. Les forages sont remplis d'un coulis fait de bentonite, sable, et d'eau dont la conductivité thermique serait de 1,5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> (Tableau 2.2). Chaque puits contient un ou deux tubes en U de polyéthylène haute densité avec un diamètre externe  $(d_{ex})$  variant entre 33,4 et 42,2 mm et celui interne  $(d_{in})$  varie entre 27 et 34 mm, selon le scénario choisi.

Paramètre de conception	Valeur
Espacement entre forages (m)	6,0
$\lambda$ coulis (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1,5
$\lambda$ tube (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,4
C coulis (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	3,9
C tube (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	1,5
Pourcentage de propylène glycol (%)	25,0

Tableau 2.2	Caractéristiques commu	nes des scénarios	de simulation	des systèmes	géothermiques.
-------------	------------------------	-------------------	---------------	--------------	----------------

Les ÉCG considérés pour les simulations sont installés dans des puits forés à une profondeur maximale de 200 m qui pourrait avoir un diamètre variant de 75,4 à 152,4 mm selon les technologies de forages disponibles. En effet, trente-six scénarios de simulation d'ÉCG ont été considérés en se basant sur les capacités locales de forage et les caractéristiques dimensionnelles des technologies de forage qui pourraient être utilisées à Kuujjuaq pour l'aménagement des systèmes géothermiques, ainsi que sur les propriétés thermiques du sous-sol formé de dépôts meubles et du roc. Pour chaque type de PÀC géothermique, soit PÀCGA et PÀCGÉ, c'est donc dix-huit scénarios de simulations qui ont été considérés dans des terrains avec des roches intrusives et d'autres avec des paragneiss (Tableaux 2.3 et 2.4).

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8	Scénario 9
Trues de ferrere	Forage au	Forage	Forage	Forage	Forage				
Type de lorage	diamant	diamant	diamant	diamant	diamant	rotatif	rotatif	rotatif	rotatif
L ÉCG (m)	170	220	150	170	100	220	150	150	100
N forages	8	5	10	9	8	5	5	8	7
<i>d</i> forage (mm)	75,4	95,8	75,4	75,4	75,4	152,4	152,4	152,4	152,4
Type de tuyau	Simple U	Double U	Double U	Double U	Double U				
Taille nominale des tuyaux (po)	3/4"	1 1/4"	3/4"	3/4"	3/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"
<i>d</i> <sub>ex</sub> tuyau (mm)	33,4	42,2	33,4	33,4	33,4	42,2	42,2	42,2	42,2
<i>d</i> <sub>in</sub> tuyau (mm)	27	34	27	27	27	34	34	34	34
Débit (I s <sup>-1</sup> )	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>-</b> 1	Roches								
Type de loc	intrusives								
Épaisseur de roc	140	190	120	140	70	190	120	120	70
Type de dépôts meubles	Alluvions								
Épaisseur de dépôts meubles	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\lambda$ sous-sol (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	2,7	2,8	2,7	2,7	2,5	2,8	2,7	2,7	2,5
C sous-sol (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,6
	Scénario 10	Scénario 11	Scénario 12	Scénario 13	Scénario 14	Scénario 15	Scénario 16	Scénario 17	Scénario 18
L ÉCG (m)	190	250	150	170	100	220	150	160	100
Type de roc	Paragniess								
Épaisseur de roc	160	220	120	140	70	190	120	130	70
Turne de dénâte moubles	Dépôts								
Type de dépois méubles	marins								
$\lambda$ sous-sol (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	2,6	2,6	2,6	2,6	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4
C sous-sol (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6

 Tableau 2.3
 Scénarios de simulations des ÉCG verticaux avec une PÀCGÉ ClimateMaster.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8	Scénario 9
Turne de ferrere	Forage au	Forage	Forage	Forage	Forage				
Type de forage	diamant	diamant	diamant	diamant	diamant	rotatif	rotatif	rotatif	rotatif
L ÉCG (m)	180	170	150	120	100	200	150	120	100
N forages	3	3	3	5	4	2	3	4	3
<i>d</i> forage (mm)	75,4	95,8	75,4	75,4	75,4	152,4	152,4	152,4	152,4
Type de tuyau	Simple U	Double U	Double U	Double U	Double U				
Taille nominale des tuyaux (po)	3/4"	1 1/4"	3/4"	3/4"	3/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"
<i>d</i> <sub>ex</sub> tuyau (mm)	33,4	42,2	33,4	33,4	33,4	42,2	42,2	42,2	42,2
<i>d</i> <sub>in</sub> tuyau (mm)	27	34	27	27	27	34	34	34	34
Débit (I s <sup>-1</sup> )	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>-</b> -	Roches								
Type de loc	intrusives								
Épaisseur de roc	150	140	120	90	70	170	120	90	70
Type de dépôts meubles	Alluvions								
Épaisseur de dépôts meubles	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\lambda$ sous-sol (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	2,7	2,8	2,7	2,7	2,5	2,8	2,7	2,7	2,5
C sous-sol (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,6
	Scénario 10	Scénario 11	Scénario 12	Scénario 13	Scénario 14	Scénario 15	Scénario 16	Scénario 17	Scénario 18
Type de roc	Paragniess								
Turne de dénâte moubles	Dépôts								
Type de dépois méubles	marins								
$\lambda$ sous-sol (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	2,6	2,6	2,6	2,6	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4
C sous-sol (MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6

# Tableau 2.4 Scénarios de simulations des ÉCG verticaux avec une PÀCGA Robur.

#### Propriétés thermiques du sous-sol

Les propriétés thermiques effectives du sous-sol sont basées sur les mesures de laboratoire, considérant la profondeur de forage choisi et l'épaisseur relative de dépôts meubles attendue. La conductivité thermique et la capacité thermique volumique qui doivent être spécifiées dans GLHEPro ont ainsi été déterminées avec la moyenne arithmétique (Clauser, 2014a ; Clauser, 2014b) :

$$\lambda, C_{\rm ari} = \sum_{i=1}^{N} n_i \lambda_i, C_i$$
[11]

où N est le nombre de niveaux lithostratigraphiques, soit 2 pour les dépôts meubles et les roches, i est le niveau lithostratigraphique, et n est l'épaisseur relative du niveau considérant la longueur de forage.

#### • Température du sous-sol

La température moyenne du sous-sol a été déterminée selon le gradient géothermique mesuré et la longueur de forage anticipée. Un profil de température a été mesuré dans un forage d'une profondeur de 80 m situé à Kuujjuaq à l'aide d'un câble gradué et d'une sonde de température submersible. La température a été extrapolée jusqu'à une profondeur de 300 m selon le gradient géothermique mesuré.

### 2.4.2.3.1 Économie d'énergie

Une évaluation des économies d'énergie était nécessaire à l'étape finale de ce projet pour démontrer la pertinence d'utiliser des PÀC géothermique dans un climat subarctique. Le scénario de référence pour évaluer les économies d'énergie est le chauffage avec une chaudière au diesel présentant un *COP* de 0,8. Le coût estimé pour le diesel est 1,63 \$ L<sup>-1</sup>, (Makivik Corporation, 2018), soit le coût après subventions, avec une enthalpie de combustion d'environ 38 080 KJ L<sup>-1</sup> (Belzile et al. 2017). Pour les simulations de PÀC géothermique, les charges au sol en mode chauffage sont égales à la différence entre les charges au bâtiment et la consommation de la PÀC. L'économie d'énergie est donc considérée égale aux charges au sol. Le coût considéré pour l'électricité produite de façon autonome avec les panneaux solaires est de l'ordre de 0,70 \$/kWh (Belzile et al. 2017a). Les économies d'énergie possibles et la réduction de diesel associée ont ainsi été quantifiées selon les simulations d'ÉCG basées sur le contexte climatique et géologique de Kuujjuaq. La réduction d'émission de gaz à effet de serre a aussi été évaluée. Le coefficient d'émission de CO<sub>2</sub> considéré est de 2,7x10<sup>-3</sup> tonne par litre de diesel (Division des Inventaires et rapports sur les polluants, 1990).

# 3 RÉSULTATS

#### 3.1 Profils de résistivité électrique

L'utilisation de la méthode ERT sur le site de calibration, incluant le puits W18, a permis d'obtenir une section de résistivité électrique et de l'interpréter pour déduire un modèle géologique décrivant l'état et la répartition lithostratigraphique de sous-sol (Figure 3.1). Une corrélation entre les levés géophysiques et la géologie du secteur a été réalisée pour évaluer la profondeur du socle rocheux et identifier l'état du pergélisol. Les autres profils d'ERT mesurés sur les trois autres sites à Kuujjuaq sont présentés en annexes (7.3). Le modèle de résistivité de départ a toujours été choisi homogène et égal à la moyenne géométrique des mesures de résistivité apparente, même lorsque certaines informations a priori étaient disponibles comme au site d'étalonnage. Tous les résultats d'inversion ont montré un mauvais ajustement final par rapport à la racine carrée du carré moyen, la fonction normalisée d'ajustement des données, avec une correspondance valide entre la résistivité observée et calculée et une matrice de résolution appropriée. Néanmoins, les inversions avec des estimations d'erreur ont pris plusieurs itérations, soit 7 à 14 pour atteindre la convergence. Les sections de résistivité du modèle final ont montré des artefacts qui, sur la base des informations a priori disponibles, avaient peu de choses à voir avec la section géologique réelle. Cela a confirmé qu'une estimation d'erreur faite uniquement par des mesures de répétabilité ne prend pas en compte les erreurs systématiques qui sont néanmoins importantes (Binley, 2015). Une différence est même évidente entre la sélection d'une valeur de bruit homogène pour l'ensemble du jeu de données en fixant  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  et l'affectation de l'écart-type de répétabilité à chaque quadripôle. Le premier cas apporte clairement des résultats plus lisses tandis que le dernier est plus susceptible de créer des artefacts d'inversion. Ces résultats ont confirmé que dans les cas actuels, en raison de l'absence d'informations sur les erreurs suffisantes et approfondies, le meilleur mode de fonctionnement consistait à calculer  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  à partir de mesures de répétabilité et à les augmenter jusqu'à 50 % afin d'éviter qu'une sous-estimation du niveau de bruit n'atteigne pas des sections géophysiques peu représentatives. On estime qu'une éventuelle section trop lisse est beaucoup moins préjudiciable qu'une analyse fondée sur une estimation erronée. La diagonale de la matrice de résolution (Alumbaugh et al. 2000 ; Binley et al. 2005), plutôt que la sensibilité (Kemna, 2000 ; Hermans et al. 2012), ou l'indice de profondeur de l'enquête (Oldenburg et al. 1999), ont été utilisés pour évaluer la fiabilité des modèles de résistivité réelle pour identifier des artefacts d'inversion probables (Day-Lewis et al. 2005). Le calcul de la matrice de résolution est lourd, mais il a donné une évaluation directe de la façon dont les paramètres du modèle sont trouvés avec l'inversion et a affiché l'effet de la régularisation sur

34

chaque paramètre (Binley et al. 2005). Des routines d'inversion avec un et deux éléments de maillage quadrilatéral par espacement des électrodes ont été exécutées. Finalement, un maillage grossier a été utilisé pour accélérer le calcul. La régularisation normale et isotrope a toujours été choisie. En effet, les mesures de résistivités électriques apparentes suivies de l'inversion de données ont permis de synthétiser un modèle de résistivité et une pseudo-section calculée à partir de ce modèle. Le logiciel a comparé la pseudo-section mesurée et modélisée et a fourni un pourcentage d'erreur entre les deux. Le modèle de résistivité final a été choisi de façon à minimiser l'écart moyen entre la pseudo-section mesurée et calculée. Les valeurs les plus élevées de résistivité électrique, variant entre 2700 et 5000 Ohm m, sont associées au socle rocheux qui est moins électriquement conducteur que les matériaux meubles. De plus, un changement brusque des valeurs de résistivité électrique a été détecté à la droite de la section en allant vers des valeurs les plus faibles d'environ 1550 et même 400 Ohm m. Ceci peut être expliqué par la présence d'une zone fracturée ou une discontinuité présente dans le substrat rocheux facilitant la circulation des fluides (Gentier, 1988). Les valeurs de résistivité électrique les plus faibles, d'environ 400 Ohm m, sont associées aux sédiments marins les plus conducteurs, alors que le till a montré une résistivité électrique moyenne à faible allant de 1550 à 2700 Ohm m.



Figure 3.1 Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS au niveau de site de calibration ayant le puits de captage d'eau souterraine W18.

L'image obtenue est une représentation en coupe (X,Z) et en continu des variations de résistivité aux endroits sondés. L'analyse de cette image a permis de mettre en évidence la profondeur du socle rocheux, mais aucune évidence de pergélisol continu n'a été détectée.

Un pergélisol discontinu et parfois sporadique est attendu dans ce secteur, mais des lentilles du sol gelé n'ont pas été remarquées dans ce site avec la méthode de sondage utilisée. Les interprétations des autres profils de résistivité électrique sont présentées à l'annexe (7.3).

### 3.2 Distribution des propriétés thermiques

### • Dépôts meubles

Selon les conditions in situ, les dépôts alluvionnaires sont caractérisés par la conductivité thermique moyenne la plus faible égale à 0,9 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> et par une faible capacité thermique volumique de 1,8 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> à cause d'une faible présence d'eau. Le till a une conductivité thermique et une capacité thermique volumique légèrement plus élevées avec une moyenne de 1,1 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> et 2,0 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement. Les valeurs les plus élevées ont été observées sur les échantillons de sédiments marins avec une conductivité thermique moyenne de 1,2 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> et une capacité thermique volumique moyenne de 2,3 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (Figure 3.2).



Figure 3.2 Propriétés thermiques des dépôts meubles in situ.

Lorsque saturés en eau, tous les dépôts analysés (marins, glaciaires et alluviaux) présentent des valeurs de propriétés thermiques supérieures à celle des matériaux en conditions in situ (Figure 3.3). Les dépôts alluvionnaires présentent toujours la valeur de conductivité thermique la plus faible, avec une moyenne de 1,4 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, suivis par les dépôts marins et les tills glaciaires qui ont une valeur moyenne plus élevée de 1,5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> et de 1,6 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement. En ce qui concerne la capacité thermique, les dépôts marins et les tills ont des valeurs semblables de 3,0 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement, tandis que les dépôts

alluvionnaires se caractérisent par une capacité légèrement supérieure à stocker de l'énergie thermique avec une moyenne égale à 3,2 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>.



Figure 3.3 Propriétés thermiques des dépôts meubles saturés.

Les dépôts quaternaires de la région ont une conductivité thermique faible à modérée et une capacité thermique volumique élevée, indiquant un potentiel modéré pour les PÀC géothermiques et des perspectives de développement valables pour les systèmes de stockage thermique souterrain.

Des cartes de conductivité thermique de dépôts meubles *in situ* et saturés ont été établies montrant la répartition de valeurs pour les différents types de sédiments quaternaires variant de 0,6 à 1,8 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> en conditions *in situ* et jusqu'à 2 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> lorsque saturés (Figure 3.4). La capacité thermique volumique varie dans le cas *in situ* et saturé de 1,3 à 3,4 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> et de 2,4 à 3,4 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement (Figure 3.5).



Figure 3.4 Conductivité thermique des dépôts meubles en condition saturée.

Figure 3.5 Capacité thermique volumique des dépôts meubles en condition saturée.

#### Roches

Les roches intrusives montrent, selon les conditions in situ, la conductivité thermique la plus élevée et la capacité thermique volumique la plus faible comparativement à celles des paragneiss, avec des moyennes de 2,7 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> et 2,2 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>, respectivement (Figure 3.6). Lorsque saturées en eau, les roches intrusives sont caractérisées, par la conductivité thermique moyenne la plus élevée égale à 3,0 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Les paragneiss présentent une valeur légèrement plus faible de conductivité thermique avec une moyenne de 2,9 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, alors qu'ils ont la capacité thermique volumique la plus élevée avec une movenne de 2,4 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>. Les roches intrusives montrent une movenne de capacité thermique volumique moyenne d'environ 2,3 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (Figure 3.7). Les mesures de porosité des échantillons de roches ont montré que les roches intrusives et les paragneiss ont une porosité semblable de 2 à 3 % et 1,7 à 1,8 % à pression élevée. La pression et la porosité sont inversement proportionnelles (Figure 3.8). Des cartes synthèses des propriétés thermiques de roches ont été élaborées montrant, lorsque saturées, une variation importante de la conductivité thermique de 1,9 à 4,6 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, (Figure 3.9), et une faible variation de la capacité thermique volumique de 2.1 à 2.8 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup> (Figure 3.10).

La caractérisation thermique de dépôts meubles et des roches confirme que la teneur en eau joue un rôle important dans l'amplification des propriétés thermiques. Les conditions saturées sont jugées plus représentatives des conditions *in situ* puisque le niveau de la nappe d'eau souterraine est généralement de 1 à 2 m sous la surface du sol à Kuujjuaq.

À noter que les mesures de conductivité thermique et de capacité thermique volumique ont été réalisées de façon parallèle et perpendiculaire à la foliation des roches et préparant des rondelles pour les deux directions qui sont placées entre la source chaude et la source froide de l'appareil de mesure FOX-50. La direction de foliation influence les mesures étant donné que les propriétés thermiques sont anisotropes. Les valeurs décrites ci-dessus et montrées aux Figures (3.6) à (3.10) sont mesurées parallèlement à la foliation des roches. Certaines valeurs de conductivité thermique saturée mesurées de façon perpendiculaire à la foliation de roche sont présentées dans les figures (3.9) et (3.10). Les autres valeurs de mesures de propriétés thermiques en direction perpendiculaire sont présentées à l'annexe (7.4).



Figure 3.6 Propriétés thermiques du roc *in situ*.



Figure 3.7 Propriétés thermiques du roc saturé.



Figure 3.8 Porosité du roc selon la pression.



Figure 3.9 Conductivité thermique du roc en condition saturée.



Figure 3.10 Capacité thermique volumique du roc en condition saturée.

### 3.3 Température du sous-sol

La température considérée au niveau du sous-sol est basée sur la température mesurée au puits W18 à Kuujjuaq en comparaison à celle au niveau d'un forage minier à la Baie Nipigon à Ontario dans le bouclier canadien (Figure 3.11). Pour le profil bleu mesuré de Kuujjuaq, la température à 50, 75 et 100 m a été évaluée en extrapolant de manière linéaire le profil mesuré. Les valeurs obtenues sont de 1,0 ; 1,3 et 1,6 °C, représentant la température moyenne pour des forages atteignant 100, 150 et 200 m de profondeur. Ces températures moyennes ont été utilisées dans la simulation des systèmes de PÀC géothermique.



Figure 3.11 Profils de température du sous-sol à l'endroit du puits W18 pour Kuujjuaq et du forage minier pour la Baie Nipigon (Labrosse, 2019).

# 3.4 Profils de charges de consommation énergétique

La consommation énergétique annuelle du bâtiment est de 98 626 kWh pour le chauffage alors que la climatisation représente seulement 33 kWh.

La charge de chauffage mensuelle maximale a lieu en janvier et est de 15 003 kWh, alors qu'en climatisation, la demande maximale est en juillet avec 17,7 kWh (Tableau 3.1). Les charges de pointes les plus élevées sont de 68,3 kW au mois de mars, en chauffage, et de 0,9 kW au mois de juillet, en climatisation.

	Charges t	otales (kWh)	Charges de pointes (kW)			
Mois	Chauffage	Climatisation	Chauffage	Climatisation		
Janvier	15 003	0	67,5	0		
Février	12 832	0	65,9	0		
Mars	13 466	0	68,3	0		
A∨ril	9 032	0	56,4	0		
Mai	6 366	0	30,7	0		
Juin	3 140	4,5	23,6	0,7		
Juillet	1 585	17,7	19,3	0,9		
Août	2 060	16,3	17,5	0,8		
Septembre	4 149	0	26,3	0		
Octobre	7 037	0	34,9	0		
Novembre	9 767	0	46,1	0		
Décembre	14 189	0	65,5	0		

 Tableau 3.1
 Charges mensuelles de consommation énergétique.

La demande de chauffage est présente durant toute l'année et spécialement importante durant la période de septembre à mai (Figure 3.12). La demande de climatisation est considérée faible et de courte durée de juin à août.



Figure 3.12 Profils de charges énergétiques du bâtiment de référence.

### 3.5 Température d'opération des systèmes géothermiques simulés

Bien que la température moyenne du sous-sol soit de 1 °C ou légèrement supérieure, les résultats de simulation démontrent qu'une PÀC géothermique peut être opérée à Kuujjuaq et assurer des économies d'énergie. En effet, les simulations du système géothermique ont montré que les ÉCG peuvent fonctionner au-dessus de la température critique de la PÀC géothermique considérée comme étant d'environ - 7 °C, même si la température du sol est près du point de congélation et que les charges du bâtiment sont débalancées.

Le scénario de simulation 2 est le cas où la température du fluide dans l'ÉCG est la plus avantageuse pour une PÀCGÉ et il consiste en cinq forages de 220 m de longueur chacun installés dans les roches intrusives. Ce scénario montre une température minimale à la sortie de l'ÉCG de - 3,8 °C dans la première année et elle diminue progressivement pour atteindre - 6,4 °C à la fin des simulations réalisées sur une période de vingt ans (Figure 3.13).

Pour le cas de PÀCGA, le scénario 4 qui implique cinq forages de 120 m de profondeur installés dans les roches intrusives est celui qui indique les températures d'opération les plus avantageuses. Lors de la première année de simulation, la température minimale à la sortie de l'ÉCG est de - 4 °C et elle diminue progressivement pour atteindre - 5,9 °C à la fin des simulations.

Les résultats de simulation indiquent que les PÀCGÉ nécessitent environ 90 % plus de forages que les PÀCGA pour maintenir une température d'opération semblable. En effet, comme le *COP* d'une PÀCGÉ est plus élevé que celle d'une PÀCGA, les charges imposées au sous-sol sont plus élevées. La température d'opération minimale semble se stabiliser avec le temps dans tous les scénarios, ce qui permettrait une opération durable du système.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8	Scénario 9
<i>T</i> <sub>min</sub> moyenne du fluide des ÉCG	- 7,2	- 7,2	- 7,1	- 7,1	- 7,0	- 8,7	- 8,5	- 8,0	- 7,9
<i>T</i> <sub>min</sub> à l'entrée des ÉCG	- 8,0	- 8,9	- 8,8	- 7,9	- 7,8	- 10,5	- 10,6	- 9,2	- 9,2
$T_{\min}$ à la sortie des ÉCG	- 6,5	- 6,4	- 6,5	- 6,5	- 6,5	- 6,9	- 6,8	- 6,9	- 6,8
	Scénario 10	Scénario 11	Scénario 12	Scénario 13	Scénario 14	Scénario 15	Scénario 16	Scénario 17	Scénario 18
$T_{\min}$ moyenne du fluide des ÉCG	- 7,5	- 7,2	- 7,4	- 7,2	- 7,4	- 8,6	- 8,4	- 8,1	- 8,3
$T_{\min}$ à l'entrée des ÉCG	- 8,0	- 8,8	- 8,0	- 7,9	- 8,0	- 10,5	- 10,6	- 9,2	- 9,2
T à la cortin des ÉCC									

 Tableau 3.2
 Température d'opération de systèmes de PÀCGÉ ClimateMaster à la fin de la 20<sup>ème</sup> année.

Tableau 3.3 Température d'opération de systèmes de PÀCGA Robur à la fin de la 20<sup>ème</sup> année.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8	Scénario 9
$T_{\min}$ moyenne du fluide des ÉCG	- 6,3	- 6,3	- 6,2	- 6,2	- 6,3	- 7,5	- 7,5	- 7,0	- 7,3
<i>T</i> <sub>min</sub> à l'entrée des ÉCG	- 7,1	- 7,1	- 7,0	- 6,9	- 6,8	- 9,2	- 9,0	- 7,9	- 7,8
<i>T</i> <sub>min</sub> à la sortie des ÉCG	- 5,8	- 5,9	- 5,7	- 5,9	- 6,0	- 5,9	- 6,0	- 6,1	- 6,0
	Scénario 10	Scénario 11	Scénario 12	Scénario 13	Scénario 14	Scénario 15	Scénario 16	Scénario 17	Scénario 18
<i>T</i> <sub>min</sub> moyenne du fluide des ÉCG	- 6,1	- 6,3	- 6,0	- 7,3	- 7,3	- 7,5	- 7,3	- 7,0	- 7,1
<i>T</i> <sub>min</sub> à l'entrée des ÉCG	- 7,0	- 7,2	- 7,1	- 8,9	- 9,0	- 9,2	- 9,0	- 8,0	- 8,1
<i>T</i> <sub>min</sub> à la sortie des ÉCG	- 5 8	- 5 9	- 5 8	- 6 0	- 6 0	- 6 0	- 6 1	- 6 1	- 6 0



Figure 3.13 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon le scénario 2.



Figure 3.14 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon le scénario 4.

# 3.6 Énergie et coûts liés au chauffage

Les économies d'énergie ont été évaluées en se basant sur les scénarios des figures (3.13) pour la PÀCGÉ (Scénario 2) et (3.14) pour la PÀCGA (scénario 4), ainsi que les hypothèses émises à la section (2.4) pour la fournaise au diesel. La PÀCGA permet de réaliser des économies monétaires plus élevées considérant le prix d'électricité avec panneaux solaires qui a été fixé à 0,7 \$ kWh<sup>-1</sup> et le prix du diesel fixé à 1,63 \$ l<sup>-1</sup>. Par contre, la PÀCGÉ permet de réduire à zéro les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>). La consommation énergétique des systèmes de chauffage simulés, qu'il s'agisse de l'électricité ou du diesel, a été rapportée kWh an<sup>-1</sup> afin de comparer les économies d'énergie potentielle. La PÀCGÉ permet de réduire de 76 % l'énergie utilisée pour le chauffage du bâtiment type à Kuujjuaq, car le *COP* moyen tiré des résultats de simulation est plus élevé que ceux des autres scénarios.

Source d'énergie	Technologie	COP moyen	Diesel consommé (I an <sup>-1</sup> )	Électricité consommée (kWh an <sup>-1</sup> )	Coût (\$ an <sup>-1</sup> )	Économie de coût (% an <sup>-1</sup> )	CO₂ équiv. (tonne an <sup>-1</sup> )	Économie de CO₂ équiv. (% an⁻¹)	Consommation énergétique du système (kWh an <sup>-1</sup> )	Économie d'énergie potentielle (% an <sup>-1</sup> )
Р	PÀCGÉ	3,6	0	32 162	22 513	11,7	0	100	32 162	76,0
Diesel	PÀCGA	1,3	7 086	0	11 550	54,7	19,1	54,7	74 952	54,7
Diesel	Chaudière au diesel	0,8	15 642	0	25 497	0	42,2	0	165 499	0

Tableau 3.4	Comparaison des	technologies de	chauffage en te	ermes d'économie	annuelle monétaire et d'énergie.
-------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	----------------------------------

# 4 **DISCUSSION**

Le travail de recherche réalisé a démontré qu'il est possible, selon les conditions de terrain inventoriées à Kuujjuaq et les analyses quantitatives effectuées, d'utiliser des systèmes de PÀC géothermique en climat subarctique alors qu'aucun système de la sorte n'a encore été opéré dans un milieu aussi froid. Les éléments de la méthodologie qui ont joué un rôle important dans les résultats obtenus sont discutés ci-dessous.

Les levés de résistivité électrique ont permis de bien comprendre le contexte géologique de la zone d'étude. Le sous-sol est hautement résistif et l'analyse des données dans ce contexte n'est pas simple. Les relevés réalisés suggèrent qu'il n'y a pas de pergélisol continu dans les secteurs analysés, ce qui concorde avec le profil de température montré à la Figure (3.11). En effet, la température mesurée au niveau de forage W18 se situe légèrement sous 0 °C à une profondeur de 10 à 20 m sous la surface. L'eau souterraine qui remplissait le puits au moment des mesures n'était toutefois pas gelée, possiblement à cause d'un écoulement d'eau souterraine verticale de faible débit vers la surface du puits. Des travaux de recherche ont récemment été réalisés sur le pergélisol au Nunavik avec la méthode ERT, dont la tomographie de résistivité électrique en forage dans le but de développer une approche géophysique originale et des connaissances sur la géocryologie des buttes de pergélisol (El Baroudi, 2018). Le site de ses études est localisé près de la communauté inuite d'Umiujaq sur la côte est de la Baie d'Hudson. Des diagraphies de résistivité électrique ont été effectuées le long de deux câbles à électrodes foncés dans deux forages espacés de 5 m l'un de l'autre dans la butte de pergélisol. L'inversion des données de la tomographie de la résistivité électrique forage-forage a été effectuée à l'aide du logiciel RES2DINV (Geotomo Software, 2000). Les tomographies électriques ont atteint une profondeur maximale de 7,8 m par rapport à la surface de la butte de pergélisol. L'ensemble des tomographies de résistivité électrique selon les deux configurations des électrodes du DD et WS réalisées ont présenté des variations similaires. Une augmentation de résistivité électrique à 1,5 m de profondeur qui coïncide avec l'interface mollisol-pergélisol riche en glace a été plus marquée pour la configuration du DD que celle de WS. Une diminution légère de la résistivité électrique a été notée à une profondeur de 7 m sur la tomographie de résistivité électrique mesurée avec la configuration du DD le long d'un forage. Il a été constaté que cette diminution est probablement associée à une zone plus pauvre en glace dans le pergélisol. À titre de comparaison, des diminutions semblables de résistivité électrique n'ont pas été observées pour les sondages réalisés dans le cadre du présent projet à Kuujjuaq. De plus, les diagraphies et les tomographies de résistivité électrique en forage réalisées par El Baroudi (2018) ont permis

d'identifier non seulement les différents cryofaciès dans la butte de pergélisol, mais aussi l'impact d'une mare de thermokarst sur la dégradation du pergélisol. L'approche d'investigation géoélectrique développée dans le cadre du projet d'El Baroudi (2018) pour l'auscultation du pergélisol a été utilisée pour identifier des zones vulnérables à la dégradation du pergélisol avant la construction d'infrastructures nordiques ou au droit de telles infrastructures déjà construites pour évaluer leur vulnérabilité. La méthode géophysique d'ERT appliquée à Kuujjuaq est semblable, mais n'aura permis que de détailler la lithologie sans détection de la présence du pergélisol qui est supposé discontinu à Kuujjuaq.

Les conditions de pergélisol sont évidemment différentes à Umiujaq et Kuujjuaq, mais dans tous les cas, il faut tenter de minimiser l'impact de la fonte du pergélisol face au réchauffement climatique. Il serait donc préférable d'éviter l'aménagement d'ÉCG aux endroits ayant des dépôts meubles de plus 30 m d'épaisseur et où la présence de pergélisol est observée afin d'assurer la stabilité des dépôts meubles qui sont jugés plus à risques.

Les levés géophysiques révèlent aussi de l'information sur la profondeur du socle rocheux qui est de l'ordre de 10 à 40 m aux endroits sondés. Les forages inventoriés à Kuujjuaq révèlent quant à eux une profondeur du roc variant de 24 à 81 m (Annexe 7.1). L'épaisseur des dépôts meubles est un facteur important à considérer dans la conception des ÉCG. En effet, lorsqu'il y a suffisamment de dépôts meubles, des ÉCG horizontaux dans des tranchées peuvent être installés bien que cette option n'a pas été abordée dans ce travail. L'aménagement est effectué sans foreuse, ce qui pourrait faciliter le déploiement des systèmes géothermiques dans des régions isolées comme les villages du Nunavik où des foreuses ne sont pas toujours disponibles. Cette option a été étudiée par Belzile et al. (2017b) qui a simulé l'opération de systèmes de PÀC géothermique avec des ÉCG horizontaux situés dans le mollisol pour une station de recherche à Kangigsualujjuag, dont la demande annuelle en chauffage est de 15 900 kWh. Le système de PÀCGA, dont l'opération simulée révélait un coût d'opération d'environ 2 450 \$ an<sup>-1</sup> générerait des économies d'énergie annuelles de l'ordre de 23 047 \$. Ce type de système pourrait être installé à Kuujjuaq, aux endroits où la profondeur des dépôts meubles est plus de 2 à 3 m. Certaines technologies de forage au diamant utilisées pour l'exploration minière et de forage rotatif sont toutefois disponibles à ou près de Kuujjuag. C'est pour cette raison que des ÉCG verticaux aménagés dans des forages ont été considérés dans la présente étude. Dans ce contexte, la température du sous-sol peut être supposée constante tout le long de l'année, contrairement aux systèmes horizontaux qui sont installés à faible profondeur, moins de 2 m, où le sous-sol est sujet aux variations de température saisonnières (Belzile et al. 2017b). En effet, le profil de température mesuré à Kuujjuag indique qu'il n'y a plus de changement de température saisonnier de 10 à 20 m de profondeur (Figure 3.11).

C'est pour cette raison que des températures constantes égales à 1 ; 1,3 et 1,6 °C ont été considérés pour la simulation d'ÉCG de 100, 150 et 200 m de profondeur, respectivement. Dans les conditions climatiques froides de Kuujjuaq, le système géothermique peut quand même être opéré, mais avec un fluide caloporteur dont la température minimale à la sortie de l'ÉCG varie de - 6,4 à - 5,9 °C selon le scénario considéré (Figures 3.13 et 3.14). En effet, la température du fluide caloporteur dans ces conditions ne diminue pas sous la température critique pour laquelle les PÀC sont conçues et qui est d'environ - 7 °C, ainsi que sous la température du point de congélation de fluide caloporteur qui est de - 14 °C (25 % en volume du propylène glycol). Une des limites des modèles utilisés dans ce contexte de basse température est qu'ils ne prennent pas en compte le changement de phase de l'eau dans le sol qui pourrait geler et dégeler. La porosité du roc à Kuujjuaq étant faible (Figure 3.8), il apparait raisonnable de négliger les effets de chaleur latente liée aux changements de phase, surtout lorsque l'épaisseur des dépôts meubles est faible.

La conductivité thermique du sous-sol est un facteur important qui affecte la température du fluide à la sortie de l'ÉCG. Le risque d'un système sous-dimensionné a ainsi été minimisé en échantillonnant les matériaux géologiques et en mesurant la conductivité thermique en laboratoire. Pour le cas de Kuujjuaq, une évaluation de la variation de conductivité thermique en fonction de la saturation en eau a été effectuée. Les échantillons de dépôts meubles saturés en eau montrent une conductivité thermique de 40 à 50 % plus élevée et sont jugés plus représentatifs comme la profondeur de la nappe est d'environ 1 à 2 m sous la surface pour tout le village. Des simulations géostatistiques ont été effectuées par Perozzi et al. (2016) dans un secteur au nord de Montréal pour tenter de déterminer la distribution spatiale et l'incertitude de la conductivité thermique au niveau du roc. Les résultats obtenus avec les simulations séquentielles gaussiennes ont été présentés sous la forme d'une application web interactive permettant d'identifier la conductivité thermique du roc. L'application d'une méthode semblable à Kuujjuag constitue une prochaine étape pour la cartographie de la conductivité thermique du secteur et l'évaluation du potentiel géothermique, bien que plus d'échantillons doivent être ramassés et analysés pour effecteur des simulations représentatives. Enfin, lors de l'estimation de la longueur des ÉCG requis pour suffire aux besoins énergétiques du bâtiment, il faut tenir en compte de l'épaisseur des dépôts meubles qui affectera la conductivité thermique globale spécifiée pour les simulations. Le transfert de chaleur issu d'un ÉCG vertical étant supposé parallèle aux couches géologiques, la moyenne arithmétique a été utilisée pour le calcul de la conductivité thermique effective (Clauser, 2014a ; Clauser, 2014b).

L'opération de deux types de PÀC géothermique, soient PÀCGÉ et PÀCGA, liés à des ÉCG verticaux, a été simulée dans le cadre de cette étude. Les résultats ont montré que ces

systèmes offrent, pour le bâtiment de référence qui requiert 165 499 kWh an<sup>-1</sup> lorsque chauffé au diesel avec une fournaise d'une efficacité de 80 %, des économies annuelles d'énergie de l'ordre de 133 337 kWh pour la PÀCGÉ et de 90 547 kWh pour la PÀCGA, ce qui se traduit par des économies monétaires de 2 984 \$/an et 13 947 \$/an, respectivement. Le coût estimé pour la production d'énergie électrique solaire qui alimente la PÀCGÉ est relativement conservateur (0,7 \$ kWh<sup>-1</sup>), ce qui explique les résultats qui pourraient varier significativement avec le développement de l'énergie solaire dans le nord. Considérant une longueur de forage 100 m plus courte associée au système de PÀCGA, le retour sur l'investissement associé à ce type de système risque d'être plus rapide que celui de PÀCGÉ. Ces résultats positifs laissent croire qu'il serait intéressant de développer des PÀCGA qui fonctionneraient directement au diesel plutôt qu'au gaz. Les études de CCHRC en Alaska ont également souligné que l'utilisation des systèmes géothermiques dans des climats froids devenait possible au fur et à mesure que la technologie des PÀC s'améliorait, mais qu'il y a un manque d'expérimentation de l'opération de ces systèmes à long terme dans les climats froids. Wu et al. (2013) et You et al. (2016) ont déduit que les PÀCGA offrent des conditions avantageuses par rapport aux PÀCGÉ considérant la température moyenne du sous-sol et l'efficacité énergétique, ce qui indique que ce type de PÀC géothermique pourrait constituer une solution potentielle pour les milieux froids. Il risque toutefois d'être difficile d'intéresser les fabricants de PÁCGA (Robur Corporation, 2019) à développer des modèles fonctionnant au diesel puisque la population du Nunavik est de 13 188 personnes seulement (Wikipédia, 2019), et le reste de l'Arctique constitue qu'un petit marché.

# 5 CONCLUSIONS

### 5.1 Synthèse des résultats

L'exploitation des ressources géothermiques superficielles de basse température est envisageable à Kuujjuaq. Ce projet de maîtrise apporte un développement de connaissances face à l'opération de systèmes de PÀC géothermique en caractérisant le sous-sol dans un endroit où les problématiques énergétiques sont préoccupantes.

En effet, des technologies d'efficacité énergétique comme les PÀCGÉ et PÀCGA peuvent fournir une alternative viable pour chauffer les bâtiments des communautés nordiques afin de réduire leur consommation de diesel. Ces systèmes, selon les résultats de l'étude, permettraient d'exploiter l'inertie thermique du sous-sol même dans un climat subarctique comme à Kuujjuaq pour produire de l'énergie thermique et chauffer des bâtiments.

Le rendement des systèmes est fonction de la température et des propriétés thermiques du sous-sol qui ont montré une influence importante sur les simulations effectuées. La demande annuelle en énergie de chauffage du bâtiment simulé était de 112 922 kWh contre 33 kWh pour la climatisation, ce qui démontre bien le contexte de charges débalancées auquel le système doit faire face.

### 5.2 Perspectives et recommandations

L'étude réalisée ici pourrait être étendue à d'autres villages du Nunavik. La limite nordique, en termes de climat et de latitude, à laquelle les PÀC géothermique peuvent être opérées demeure inconnue. Un climat encore plus froid est par exemple rencontré dans le village de Salluit dont le nombre de degrés-jours sous 18 °C est de 9 608 comparativement à 8 405 pour Kuujjuaq. Des activités de recherche semblables entreprise pour d'autres villages du Nunavik aideraient à définir la limite nordique de l'opérabilité des PÀC géothermique.

À la lumière de cette étude, les points suivants sont recommandés pour à la fois approfondir la présente étude, l'étendre vers d'autres villages du Nunavik et tenter d'aménager des premiers systèmes pilotes :

 Il est suggéré d'effectuer des mesures de résistivité électrique des échantillons de roches pour les corréler à la conductivité thermique et tenter d'interpréter les sections d'ERT pour les convertir en pseudo-sections de conductivité thermique.

- Au niveau de l'approche géophysique, il serait judicieux d'utiliser d'autres méthodes comme la méthode électromagnétique dans le domaine temps (TDEM : Time Domain ElectroMagnetic) qui permet une investigation plus profonde avec des dispositifs moins grands d'une profondeur égale à celle des forages géothermiques envisagés.
- Les cartes de propriétés thermiques des échantillons de dépôts meubles et de roches ont montré que certaines régions présentent un potentiel géothermique plus favorable. Il faudrait cibler les utilisateurs potentiels au-dessus des secteurs favorables et approfondir les travaux de recherche dans ces zones d'intérêts par l'installation des forages d'exploration pour mesurer la température et aussi échantillonner le roc pour mesurer les propriétés thermiques directement dans les forages pour une vérification ultime de ce potentiel. Il serait aussi intéressant de penser au développement et à l'aménagement des villages nordiques en fonction des propriétés thermiques du sous-sol et de son potentiel géothermique.
- Des tests de réponse thermique pourraient être réalisés dans des forages pour évaluer la faisabilité d'opération des ÉCG à petite échelle.
- L'étape suivante serait de construire et faire le suivi d'un système pilote dans un projet de démonstration qui servira à valider les calculs d'économie d'énergie et démontrer qu'elles sont bien possibles en conditions réelles.
- Enfin, pour étendre la portée de cette étude, il faudrait simuler des ÉCG dans des conditions plus froides pour des villages encore plus au Nord, directement dans le pergélisol en considérant les changements de phase et la chaleur latente.

- ADEME et BRGM, 2019. La pompe à chaleur, comment ça marche ?. Disponible sur internet, <u>http://www.geothermie-perspectives.fr/article/pompe-chaleur-comment-ca-</u> <u>marche</u>, consulté le 09 Juillet 2019.
- Alumbaugh, D.-L. et Newman, G.-A., 2000. Image appraisal for 2-D and 3-D electromagnetic Inversion. Tulsa, États-Unis, Geophysics 65(5): 1455–1467, doi:10.1190/1.1444834.
- Belzile, P., Comeau, F.-A., Raymond, J. et Lamarche, L., 2017a. Revue technologique efficacité énergétique et énergies renouvelables au nord du Québec. Rapport de recherche 1716, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada, 38 pages.
- Belzile, P., Comeau, F.-A., Raymond, J., Lamarche, L. et Carreau, M., 2017b. Arctic Climate Horizontal Ground-Coupled Heat Pump. GRC Transactions, Québec, Canada, Vol. 41, 21 pages.
- Bennet, J., Claesson, J. et Hellström, G., 1987. Multipole Method to Compute the Conductive Heat Flows to and Between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3 -1987, Department of Building Technology and Mathematical Physics, University of Lund, Suède, 44 pages.
- Binley, A., 2015. Tools and Techniques: DC Electrical Methods, Treatise on Geophysics. 2nd Edition, G Schubert, Elsevier. Vol. 11, 233-259, doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00192-5.
- Binley, A. et Kemna, A., 2005. Electrical Methods, Hydrogeophysics by Rubin and Hubbard, 129-156, Springer.
- CEGIBAT, 2019. Deux PAC à absorption gaz géothermique sur nappe pour la halle multisport Jacky Trévisan de Ris-Orangis (91). Disponible sur internet, <u>https://cegibat.grdf.fr/realisations-tertiaire/pac-absorption-gaz-geothermique-halle-</u> <u>multisport-ris-orangis</u>, consulté le 09 Juillet 2019.
- Clauser, C., 2014a. Thermal storage and transport properties of rocks: heat capacity and latent heat. Encyclopedia of solid earth geophysics, 1423-1431.
- Clauser, C., 2014b. Thermal storage and transport properties of rocks: thermal conductivity and diffusivity. Encyclopedia of solid earth geophysics, 1431-1449.
- ClimateMaster, 2016. Water-source heat pump systems. Tranquility Compact Belt Drive (TC) Series Submittal Data, Models TCH072 - 120 TCV072 - 300 60 Hz - HFC-410A English Language/IP Units, 49 pages.
- Comeau, F.-A., Raymond, J., Malo, M., Dezayes, C. et Carreau, M., 2017. Geothermal potential of northern Québec: a regional assessment. Québec, GRC Transactions 41: 1076-1094.
- Coretest Systems Inc., 2016. Grain Volume Measurement System. Operator's Manual V3c2 Supplement to Operator's Manual for AP-608 Automated Permeameter-Porosimeter, Grain Volume, Morgan Hill, États-Unis, 17 pages.
- Coretest Systems, Inc. AP-608, 2017. Automated Permeameter-Porosimeter AP-608. Operator's Manual V8x, Morgan Hill, États-Unis, 145 pages.
- Crawley, D.-B., Lawrie, L.-K., Winkelmann, F.-C., Buhl, W.-F., Huang, Y.-J., Pedersen, C.-O., Strand, R.-K., Liesen, R.-J., Fisher, D.-E., Witte, M.-J. et Glazer, J., 2001. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, 33: 319-311.
- Day-Lewis, F., Singha, K. and Binley, A., 2005. On the limitations of applying petrophysical models to tomograms: A comparison of correlation loss for cross-hole electrical-resistivity and radar tomography. Journal of Geophysical Research 110(B8): B08206.
- Decagon Devices, Inc., 2007. KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. Operator's Manual, Pullman, 71 pages.

- Division des Inventaires et rapports sur les polluants, 1990-2011. Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. La proposition canadienne concernant la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Partie 2. Rapport d'inventaire national, Gatineau, Canada, 260 pages.
- Division Lab Journeaux INC., 2016. Étude géotechnique réservoir d'eau potable Kuujjuaq, Nunavik. Rapport no L-15-1839, Journeaux Assoc, Québec, Canada, 85 pages.
- El Baroudi, M., 2018. Auscultation du pergélisol par méthodes géoélectriques : tomographie de polarisation provoquée, diagraphie et tomographie de résistivité électrique en forages. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 409 pages.
- Environnement Canada, 2004. Kuujjuaq. Disponible sur internet, <u>https://fr.wikipedia.org/wiki/</u> <u>Kuujjuaq#cite\_note-4</u>, consulté le 13 avril 2019.
- Garber-Slaght, R. et Stevens V., 2014. Ground Source Heat Pumps in Interior Alaska. Lessons learned from installed systems. Rapport de recherche, Cold Climate Housing Research Center, Fairbanks, Alaska, 34 pages.
- Gentier, S., 1988. Fractures dans les roches cristallines, Effets des déformations sur les circulations de fluides. Collection Sciences & Techniques, Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Île-de-France, France, 94 pages.
- Geotomo Software, 2000. RES2DINV ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7, Geoelectrical Imaging 2D & 3D, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least square method Wenner (a,b,g), dipole-dipole, inline pole-pole, pole dipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays, on land, water and cross-borehole surveys. Manuel, Geotomo Software, Penang, Malaysia, 151 pages.
- Ghyselinck-Bardeau, M., Wuilleumier, A., Desplan, A. et Monnot, P., 2007. Outils d'aide à la décision en matière de géothermie très basse et basse énergie (nappes alluviales et thermalisme) dans le département du Tarn. Rapport publique, BRGM, Centre-Val de Loire, France, 135 pages.
- Giordano, N., Kanzari, I., Miranda, M.-M., Dezayes, C. et Raymond, J., 2017. Shallow geothermal resource assessments for the northern community of Kuujjuaq, Québec, Canada. IGCP636 Annual Meeting, Santiago de Chile, Chili, 4 pages.
- Gouvernement du Canada, 2019. Données historiques, Météo, climat et catastrophes naturelles, Données historique. Disponible sur internet, <u>http://climat.meteo.gc.ca/histo</u>rical data/search historic data f.html, consulté le 13 mai 2019.
- Gouvernement du Québec, 2003. Carte interactive, SIGÉOM. Disponible sur internet, <u>http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108\_afchCarteIntr</u>, consulté le 14 avril 2019.
- Gouvernement du Québec, 2016. Lexique stratigraphique, SIGÉOM. Disponible sur internet, <u>http://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-de-churchill/</u>, consulté le 13 avril 2019.
- Hermans, T., Vandenbohede, A., Lebbe, L. et Nguyen, F., 2012. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography. Geophysics 77(1), B11-B21.
- Jouen, T., Clément, R., Henine, H., Chaumont, C., Vincent, B. et Tournebize, J., 2016. Evaluation and localization of an artificial drainage network by 3D time-lapse electrical resistivity tomography. Environ. Sci. Pollut. Res.
- Kemna, A., 2000. Tomographic inversion of complex resistivity—Theory and application. Thèse de doctorat, Bochum Ruhr-Univ., Allemagne (publié par : Der Andere Verlag, Osnabrück, Allemagne, 196 pages.
- LaBrecque, D.J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A. et Owen, E., 1996. The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data: Geophysics, 61, 538–548.
- Labrosse, S., 2019. Température et chaleur dans la Terre. Présentation, École normale supérieur de Lyon, Lyon, 58 pages.

- Lemieux, J.-M., Fortier, R., Talbot-Poulin, M.-C., Molson, J., Therrien, R., Ouellet, M., Banville, D., Cochand, M. et Murray, R., 2016. Groundwater occurrence in cold environments: examples from Nunavik, Canada. Journal d'hydrogéologie, 1497-1515, <u>https://doi.org/1513</u>, 10.1007/s10040-016-1411-1, 19 pages.
- Lévesque, G., 2015. Architecte, Centre communautaire et Clinique de pédiatrie sociale, Kuujjuaq, Qc. Descriptif de projet, disponible sur internet, https://guillaumelevesque.c om/portfolio-posts/centre-communautaire-et-clinique-de-pediatrie-sociale-kuujjuaqqc/, consulté le 13 avril 2019.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A.-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M.-P., Ducharme, M.-A., Larrivée, K., Grandmont, K. et Lemieux, C., 2013. Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final, Projet # 520004-XXI, Centre d'études nordigues, Université Laval, Québec, Canada, 99 pages.
- Makivik Corporation, 2018. Rise in the Cost of Gasoline. Communiqué de presse, disponible sur internet, Société Makivik, <u>https://www.makivik.org/rise-in-the-cost-of-gasoline/</u>, consulté le 13 avril 2019.
- Meyer, J., Pride, D., O'Toole, J., Craven, C. et Spencer, V. (2011). Ground source heat pumps in cold climates. Rapport pour une commission, Alaska Center for Energy and Power, Cold Climate Housing Research Center Inc., Fairbanks, Alaska, 92 pages.
- Millette, J., Sansregret, S. et Daoud, A., 2011. SIMEB: Simplified interface to DOE2 and EnergyPlus - a user's perspective – case study of an existing building. Compte rendu de la 12e Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australie, 14-16 November, 2349-2355.
- Minea, V., 2014. Estimation préliminaire du potentiel géothermique au Québec, Canada. Présentation pour lors d'un colloque, Potentiel de la géothermie au Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada, 23 pages.
- Oldenburg, D.-W. et Li, Y., 1999. Estimating Depth of Investigation in DC resistivity and IP Surveys. Geophysics 64 (2), 403–416.
- Perozzi, L., Raymond, L., Asselin, S., Gloaguen, E., Malo, M. et Bégin C., 2016. Simulation géostatistique de la conductivité thermique : application à une région de la communauté métropolitaine de Montréal. Rapport R1663, Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada, 22 pages.
- Raymond, J., Comeau, F.-A., Malo, M., Blessent, D. et López Sánchez, I.-J., 2017. The Geothermal Open Laboratory: a free space to measure thermal and hydraulic properties of geological materials. IGCP636 Meeting, Santiago, Chili, 16 pages.
- Régie du bâtiment du Québec, 2012. Présentation sur le règlement modifiant le Code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique. Guide du participant, Partie 11 « Efficacité énergétique » du chapitre I Bâtiment, et Code national du bâtiment Canada 2005 (modifié), Code de construction du Québec, Québec, Canada, 119 pages.
- Robur Corporation, 2019. GAHP Line W LB Series Ground Source Gas Fired Absorption Heat Pump Heating and Cooling. ROBUR S.p.A | P.I. 00373210160. Submittal Data, États-Unis, 7 pages.
- Sansregret, S., 2012. SIMEB, Logiciel de simulation énergétique de bâtiment. Laboratoire des technologies de l'énergie, Shawinigan, Canada, 2 pages.
- School of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University, 2016. GLHEPro 5.0 For Windows Users' Guide. Manuel d'utilisation, International Ground Source Heat Pump Association, Oklahoma, États-Unis, 155 pages.
- Simard, M., Lafrance, I., Hammouche, H. et Legouix, C., 2013. Géologie de la région de Kuujjuaq et de la Baie d'Ungava (SNRC 24J et 24K). Rapport scientifique, RG 2013-04, Ministère des Ressources naturelles, Québec, Canada, 60 pages.
- Slater, L., Binley, A.M., Daily, W. et Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. J. Appl. Geophys. 44, 85–102.

- TA Instruments, 2015. Thermal conductivity instruments. Rapport scientifique, Montréal, Canada, 28 pages.
- TA Instruments, 2016. Measurements of the Volumetric Specific Heat  $C_{p\rho}$  Using the FOX Heat Flow Meter Instruments (and two rubber sheets). Rapport scientifique, New Castle, États- Unis, 4 pages.
- Wikipédia, 2019. Kuujjuaq. Disponible sur internet, <u>https://fr.wikipedia.org/wiki/Kuujjuaq</u>, consulté le 12 avril 2019.
- Wikipédia, 2019. Pouvoir calorifique. Disponible sur internet, <u>https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouv</u> <u>oir calorifique</u>, consulté le 15 avril 2019.
- Wubda, M., Descloitres, M., Yalo, N., Ribolzi, O., Vouillamoz, J.M., Boukari, M., Hector, B. et Séguis, L., 2017. Time lapse electrical surveys to locate infiltration zones in weathered hardrocks tropical areas. Journal of Applied Geophysics, Volume 142, 23-37 pages.
- Wu, W., Wang, B., You, T., Shi, W. et Li, X., 2013. A potential solution for thermal imbalance of ground source heat pump systems in cold regions: Ground source absorption heat pump. Renewable Energy 59 (2013) 39e48, 10 pages.
- Yan, D., Xia, J., Tang, W., Song, F., Zhang, X. et Jiang, Y., 2008. DeST—An integrated building simulation toolkit, Part I : Fundamentals. Building Simulation, 1: 95 110.
- York, D-A., Tucker, E-F, and Cappiello, C-C., 1981. DOE-2, Reference Manual Version 2.1. LA-7689-M Ver.2.1, LBL-8706 Rev.1, Office of Buildings and Community Systems, United States Department of Energy, Los Alamos, États-Unis, 994 pages.
- You, T., Wu, W., Shi, W., Wang B. et Li, X., 2016. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. Applied Energy 177 (2016) 515–536, 22 pages.
- Zhang, X., Xia, J., Jiang Z., Huang J., Qin, R., Zhang, Y., Liu, Y. et Jiang, Y., 2008. DeST— An integrated building simulation toolkit, Part II: Applications. Building Simulation, 1: 193-209.
### 7 ANNEXES

#### 7.1 Logs lithostratigraphiques des puits



## 7.2 Corrélation lithostratigraphique des puits



#### 7.3 Profils de résistivité électrique

• Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS de l'une des deux lignes acquises à la station de pompage du lac Stewart (Giordano et al. 2017)



 Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS et DD à l'usine de traitement d'eau



 Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS de la première ligne acquise aux serres



• Interprétation d'un profil de résistivité électrique d'une section WS de la deuxième ligne acquise aux serres



## 7.4 Mesures de caractéristiques thermiques par échantillon

• Mesures de la conductivité thermique en condition *in situ* et saturées des échantillons de dépôts meubles

Échantillon	Type de sédiment	λ in s	<i>itu</i> [W m <sup>-1</sup>	K-1]	$\lambda$ saturée [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]		
		Valeur	Dév. St.	Ν	Valeur	Dév. St.	Ν
IK1 2017		1,421	0,009	5	1,655	0,005	10
IK3 2017		1,163	0,011	9	1,273	0,011	10
IK5 2017		1,167	0,007	10	1,556	0,007	6
IK16 2017		1,296	0,023	5	1,503	0,026	9
IK17 2017	Dépôts marins	0,834	0,009	7	1,551	0,005	8
IK20 2017		1,040	0,004	8	1,425	0,011	20
IK23 2017		0,957	0,004	9	1,422	0,012	9
IK28 2017		1,781	0,010	11	1,896	0,006	10
Moyenne		1,207	0,297	64	1,535	0,185	82
IK6 2017		0,864	0,005	7	1,556	0,005	10
IK14 2017		1,156	0,008	11	0,806	0,004	9
IK22 2017		0,570	0,008	9	1,330	0,013	6
IK36 2017	Dépôts	0,795	0,024	15	1,032	0,011	11
IK40 2017	alluvionnaires	0,843	0,004	7	1,915	0,147	11
IK42 2017		1,353	0,015	9	1,646	0,027	7
Moyenne		0,930	0,279	58	1,381	0,410	54
IK7 2017		1,087	0,009	9	1,614	0,010	9
IK24 2017	Till	1,007	0,005	12	1,590	0,011	8
IK37 2017	1 111	1,305	0,009	11	1,498	0,018	9
Moyenne		1,133	0,154	32	1,567	0,062	26

Échantillon	Type de sédiment	<i>C in situ</i> [MJ m- <sup>3</sup> K <sup>-1</sup> ]		C saturée [MJ m- <sup>3</sup> K <sup>-1</sup> ]			
		Valeur	Dév. St.	Ν	Valeur	Dév. St.	Ν
IK1 2017		2,274	0,025	5	2,772	0,004	10
IK3 2017		3,176	0,007	9	3,115	0,020	10
IK5 2017		1,722	0,007	10	2,782	0,018	6
IK16 2017		2,243	0,009	5	3,378	0,045	9
IK17 2017	Dépôts marins	1,827	0,008	7	2,996	0,008	8
IK20 2017		2,405	0,009	8	3,245	0,007	20
IK23 2017		1,944	0,025	9	3,001	0,077	9
IK28 2017		2,865	0,005	11	2,953	0,014	10
Moyenne		2,307	0,505	64	3,030	0,211	82
IK6 2017		1,427	0,011	7	2,976	0,009	10
IK14 2017		2,471	0,014	11	3,627	0,044	9
IK22 2017		1,388	0,056	9	2,733	0,031	6
IK36 2017	Dépôts	1,818	0,023	15	3,891	0,014	11
IK40 2017	alluvionnaires	1,395	0,004	7	3,014	0,047	11
IK42 2017		2,021	0,012	9	2,830	0,013	7
Moyenne		1,753	0,438	58	3,179	0,468	54
IK7 2017		1,558	0,009	9	3,101	0,022	9
IK24 2017		2,014	0,004	12	2,899	0,061	8
IK37 2017	Till	2,366	0,010	11	2,965	0,040	9
Moyenne		1,979	0,405	32	2,989	0,103	26

• Mesures de la capacité thermique volumique en condition *in situ* et saturées des échantillons de dépôts meubles • Mesures de conductivité thermique en condition *in situ* et saturées des échantillons de roches

Échantillon	Type de roche	$\lambda$ in situ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\lambda$ saturée [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
		Valeur	Valeur
IK8 para		3,319	3,97
IK8 perpd		2,119	2,08
IK11 para		3,42	3,79
IK11 perpd		2,716	2,95
IK12 para		3,983	4,54
IK12 perpd		2,26	2,49
IK29 A		2,602	2,82
IK30 para		2,307	2,586
IK30 perpd		2,304	2,536
Moyenne		2,781	2,996
IK9		3,259	3,59
IK10	Roches intrusives	2,762	2,25
Moyenne		3,011	2,92
IK13 para		2,072	2,51
IK13 perpd		1,586	1,96
IK18 perpd		4,28	4,8
IK35		3,699	3,76
IK41		3,021	3,04
Moyenne		2,932	3,214
IK31		2,586	2,95
IK32 para		3,732	4,43
IK32 perpd		2,341	2,91
IK34		3,41	3,57
Moyenne		3,017	3,43
IK2		1,675	1,95
IK4		2,303	2,90
IK 15		2,047	2,30
IK19 para		3,146	3,947
IK19 perpd		1,622	2,11
IK21	Paragneiss	2,098	2,04
IK25		2,742	2,843
IK26		1,819	3,06
IK36		2,891	2,85
IK37		3,64	3,67
Moyenne		2,398	2,809

• Mesures de capacité thermique volumique en condition *in situ* et saturées des échantillons de roches

Échantillon	Type de roche	<i>C in situ</i> [MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	C saturée [MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
		Valeur	Valeur
IK8 para		2,158	2,336
IK8 perpd		2,510	2,275
IK11 para		2,413	2,430
IK11 perpd		2,242	2,321
IK12 para		2,312	2,398
IK12 perpd		2,228	2,326
IK29 A		2,531	2,592
IK30 para		2,159	2,159
IK30 perpd		2,318	2,284
Moyenne		2,319	2,347
IK9		2,281	2,254
IK10	Roches intrusives	2,113	2,426
Moyenne		2,197	2,340
IK13 para		2,419	2,507
IK13 perpd		2,313	2,413
IK18 perpd		2,369	2,268
IK35		2,631	2,672
IK41		2,492	2,216
Moyenne		2,445	2,415
IK31		2,074	2,122
IK32 para		2,491	2,664
IK32 perpd		2,250	2,294
IK34		2,394	2,282
Moyenne		2,302	2,340
IK2		2,203	2,309
IK4		2,281	2,346
IK 15		2,307	2,356
IK19 para		2,260	2,343
IK19 perpd		2,368	2,299
IK21	Paragneiss	2,474	2,650
IK25		2,431	2,645
IK26		2,467	2,712
IK36		2,414	2,487
IK37		2,293	2,117
Moyenne		2,350	2,426

•	Mesures de porosité o	es échantillons c	le roches avec la	a chambre à grains à P	= 14,7 psi
---	-----------------------	-------------------	-------------------	------------------------	------------

Échantillon	Type de roche	Ø <b>[%]</b>
		Valeur
IK8 para		2,555
IK8 perpd		1,035
IK11 para		3,365
IK11 perpd		1,920
IK12 para		3,423
IK12 perpd		4,187
IK29 A		2,025
IK30 para		2,069
IK30 perpd		3,682
Moyenne		2,696
IK9		3,912
IK10	Roches intrusives	2,430
Moyenne		3,171
IK13 para		2,876
IK13 perpd		8,191
IK18 perpd		9,462
IK35		2,082
IK41		8,879
Moyenne		6,298
IK31		1,858
IK32 para		2,835
IK32 perpd		3,188
IK34		2,148
Moyenne		2,507
IK2		10,29
IK4		1,030
IK 15		1,318
IK19 para		1,807
IK19 perpd		4,024
IK21	Paragneiss	2,424
IK25		11,176
IK26		16,941
IK36		1,256
IK37		1,643
Moyenne		5,191

• Mesures de porosité des échantillons de roches avec le porosimètre au gaz à P = 400 psi

Échantillon	Type de roche	Ø <b>[%]</b>
		Valeur
IK8 para		1,265
IK8 perpd		1,494
IK11 para		2,263
IK11 perpd		0,951
IK12 para		2,62
IK12 perpd		2,345
IK29 A		0,537
IK30 para		1,497
IK30 perpd		1,572
Moyenne		1,616
IK9		3,58
IK10	Roches intrusives	2,195
Moyenne		2,888
IK13 para		2,184
IK13 perpd		1,829
IK18 perpd		2,069
IK35		1,172
IK41		0,909
Moyenne		1,633
IK31		1,044
IK32 para		2,566
IK32 perpd		1,828
IK34		2,106
Moyenne		1,886
IK2		2,747
IK4		2,426
IK 15		1,506
IK19 para		1,354
IK19 perpd		1,732
IK21	Paragneiss	1,805
IK25		2,015
IK26		5,89
IK36		0,764
IK37		1,153
Moyenne		2,107

# 7.5 Bilan de la consommation énergétique pour la simulation du bâtiment de référence

Consommation énergétique (kWh)	Valeur
Consommation totale	132 399
Chauffage	98 626
Climatisation	33
Éclairage intérieur	10 317
Éclairage extérieur	4 196
Équipements	1 102
Rejets de chaleur	0
Ventilateurs	3 829
Pompes	0
Réfrigération	0
Eau chaude sanitaire	14 296

## 7.6 Scénarios de simulations de la réponse thermique des échangeurs de chaleur

- Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon le scénario 1
- À noter que les résultats des scénarios 2 et 3 sont similaires et ne sont pas reproduits ci-dessous





• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 4 et 5 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 6 et 7 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 8 et 9 qui sont similaires

- Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 10 et 12 qui sont similaires
- À noter que les résultats des scénarios 11 et 2 sont similaires et ne sont pas reproduits ci-dessous



 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 13 et 14 qui sont similaires



 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 15 et 16 qui sont similaires



 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGÉ ClimateMaster sur vingt ans selon les scénarios 17 et 18 qui sont similaires





 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon le scénario 1

- Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 2 et 3 qui sont similaires
- À noter que les résultats des scénarios 4 et 5 sont similaires et ne sont pas reproduits ci-dessous





• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 6 et 7 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 8 et 9 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 10, 11 et 12 qui sont similaires



 Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 13 et 14 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 15 et 16 qui sont similaires



• Variation de la température moyenne du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ÉCG pour une PÀCGA Robur sur vingt ans selon les scénarios 17 et 18 qui sont similaires