

Analyse multicritère pour évaluer les options de chauffage
des communautés isolées du Nunavik

par

Charlotte YAN

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. SC. A.

MONTRÉAL, LE 28 FÉVRIER 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Rousse, directeur de mémoire, département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hausler, président du jury, département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Glaus, membre du jury, département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 FÉVRIER 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ANALYSE MULTICRITÈRE POUR ÉVALUER LES OPTIONS DE CHAUFFAGE DES COMMUNAUTÉS ISOLÉES DU NUNAVIK

Charlotte YAN

RÉSUMÉ

De nos jours, la majorité des 300 communautés isolées du Canada sont alimentées en électricité et en chaleur au moyen de sous-produits du pétrole. Cette dépendance aux énergies fossiles entraîne, entre autres, des surcoûts dans la production énergétique et des conséquences néfastes sur l'environnement tant au niveau local que global. Cependant, les sources alternatives d'énergie dans les milieux isolés existent et certaines initiatives développées pour le climat arctique ont démontré leur faisabilité. Dans ce contexte une approche multicritère devient essentielle pour traiter un problème aux multiples acteurs, objectifs, alternatives et critères de performance, et ainsi, faciliter la comparaison de différents scénarios.

Ce mémoire présente une analyse multicritère dans le cadre d'un processus d'aide à la décision. Quatre systèmes de production de chaleur sont comparés, (1) la fournaise au mazout (solution actuelle), (2) la fournaise aux granules de bois, (3) la fournaise au gaz naturel et enfin (4) la gazéification des déchets. Une approche systémique est considérée basée sur les aspects environnementaux, sociaux et économiques. Une maison unifamiliale située à Kuujjuaq est sélectionnée comme étude de cas. Situé au 58^{ème} parallèle Nord, Kuujjuaq est la capitale de l'administration régionale Kativik qui englobe le Nunavik. La méthode de surclassement PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment and Evaluation) utilisée a permis de mettre en place un classement et d'identifier les conflits et les relations entre les différentes solutions possibles.

L'utilisation des granules de bois comme combustible dans des fournaises individuelles se révèle être la solution la plus avantageuse dans tous les scénarios considérés. Suivis de la gazéification des déchets pour les scénarios de base et environnementaux et par les fournaises au mazout (situation actuelle) dans les scénarios où les considérations sociales et économiques sont considérées.

Ces travaux répondent au besoin de limiter l'utilisation d'énergie fossile dans les communautés isolées du Nord du Québec mais ne peuvent se suffire à eux même. Les efforts mis sur la production thermique doivent se joindre aux études sur la production électrique en milieu isolé ainsi qu'à d'efficaces mesures de réduction de consommation énergétique dans tous les secteurs d'activités pour faire une réelle différence.

Mot-clés : MCDA, PROMETHEE, chauffage, Nunavik, planification énergétique.

A MULTICRITERIA APPROACH TO EVALUATE HEATING SYSTEM FOR REMOTE COMMUNITY IN NUNAVIK

Charlotte YAN

ABSTRACT

The majority of Canada's 300 remote communities must rely on petrol by-products for electricity and heating. This dependency to fossil fuel leads to vulnerability towards barrel price fluctuation and environmental impacts. However, alternative energy sources are gaining in interest in remote areas and initiatives in artic climate have proven feasibility. In this context, a multi-criteria approach is essential to take into account the multiplicity of stakeholders, objectives, alternatives and criteria.

This study presents a multi-criteria decision analysis of four alternative energy systems for heating, that is waste gasification and three types of combustion (fuel oil, natural gas and wood pellets). A systemic approach is considered based on environmental, social and economic aspects. A single-family house in Kuujjuaq is selected for a case study. Located up to the 58th parallel, Kuujjuaq is the capital of the regional administration Kativik which encompass Nunavik. The preference ranking organization method for enrichment and evaluation (PROMETHEE) used provide a final ranking of the solutions and sensibility analyses open the discussion toward this ranking.

Results show that wood pellets are the most suitable fuel for heating in all scenarios. This solution is followed by local waste gasification for the base-case and environmental scenarios and by fuel oil for the social and economic scenarios.

These results do not stand alone and join analyses made on electricity production for remote area and efficient measures to reduce consumptions.

Keywords: MCDA, PROMETHEE, space heating, Nunavik, energy planning.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Le Nunavik, un cadre particulier	5
1.1.1 Portrait.....	5
1.1.2 L'habitation au Nunavik	8
1.1.3 L'énergie au Nunavik	10
1.1.4 Barrières à surmonter.....	15
1.2 Production thermique en milieu isolé	16
1.2.1 Combustibles fossiles.....	17
1.2.2 Combustibles issus de la biomasse	19
1.2.3 Recherches et travaux	23
1.3 Les méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision	27
1.3.1 Généralités	27
1.3.2 Choix de la méthode	30
1.3.3 Les méthodes Prométhée	32
1.3.4 Analyses de sensibilité.....	36
1.3.5 Logiciel Visual Prométhée.....	37
1.4 Conclusion de la revue de littérature	39
CHAPITRE 2 MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS RANKING ALTERNATIVE HEATING SYSTEMS FOR REMOTE COMMUNITIES IN NUNAVIK	41
2.1 Introduction.....	42
2.1.1 Context.....	42
2.1.2 Objectives	42
2.1.3 Content.....	43
2.2 Methods.....	43
2.2.1 Multi-Criteria Decision Making (MCDM)	43
2.2.2 PROMETHEE methods	45
2.3 Case study	46
2.4 Different alternatives	49
2.4.1 Wood pellets	49
2.4.2 Natural gas	50
2.4.3 Waste.....	51
2.5 Criteria matrix.....	51
2.5.1 Environmental criteria	52
2.5.2 Social criteria	54
2.5.3 Economics criteria	57
2.5.4 Input data	60
2.5.5 Assumptions.....	61
2.6 Results and discussion	62

2.6.1	Results.....	62
2.6.2	Discussions and recommendations	66
2.7	Conclusion	68
2.8	Acknowledgments.....	69
CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS		71
3.1.1	La réalité Nordique	71
3.1.2	La biodiversité	72
3.1.3	La décroissance.....	72
3.1.4	Économie circulaire	73
3.1.5	Étalement urbain	74
CONCLUSION		77
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		83

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1-1	Comparaison des valeurs métriques des résistances thermiques (RSI) des maisons du Nunavik avec les codes de construction du Québec (MERN, 2015 ; Régie du bâtiment du Québec, 2012 ; SHQ, 2012)	10
Tableau 1-2	Répartition de la consommation d'énergie primaire par source au Canada en 2005, données issues de RNCAN 2006 (Paré et al., 2011)	18
Tableau 1-3	Exemple de matrice de décision	33
Tableau 1-4	Liste de fonctions disponibles pour les méthodes PROMETHEE	34
Tableau 2-1	Relevant characteristics of the house investigated	47
Tableau 2-2	Geographic data on Kuujjuaq (CANMET Energy, 2005).....	48
Tableau 2-3	Fuel supply routes.....	53
Tableau 2-4	Emissions data related to combustion of fuel oil, natural gas, wood pellets and waste residuals (Solomatnikova, 2011, p. 58).....	54
Tableau 2-5	Operation complexity assessment	55
Tableau 2-6	Change of habits assessment	56
Tableau 2-7	Direct and indirect fallouts assessment	57
Tableau 2-8	List of inputs	60
Tableau 2-9	List of criteria and associated properties	62
Tableau 2-10	Net, entering and leaving flows and complete ranking PROMETHEE	62
Tableau A3-1	Résultats de l'analyse de sensibilité sur le tableau de performance.....	79

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1-1	Carte d'ensemble du Nunavik (Makivik Corporation, 2017a).....	6
Figure 1-2	Concept d'habitation au Nunavik développé dans les années 80 (SHQ, 2012).....	9
Figure 1-3	Coût nominal et réel des importations de pétrole brut (moyenne IEA) (IEA, 2017b).....	19
Figure 1-4	Comparaison du contenu en énergie des sources d'énergies les plus communes (Surisetty, Kozinski et Dalai, 2012)	20
Figure 1-5	Conversion thermochimique de la biomasse (Solomatnikova, 2012)	21
Figure 1-6	Répartition des projets de chauffage à la biomasse sur le territoire du Canada (Madrali, 2016)	22
Figure 1-7	Vue sur la station Princesse Élisabeth	25
Figure 1-8	Vue sur la résidence Riverdale	25
Figure 1-9	Vue sur les résidences I-box 120	26
Figure 1-10	Classification des méthodes d'analyse d'aide à la décision selon (Belton et Stewart, 2002).....	28
Figure 1-11	Les différentes problématiques en analyse multicritère (Henriet, 2000)....	29
Figure 1-12	Représentation diamant du logiciel Visual PROMETHEE	38
Figure 2-1	A typical single-family three-bedroom household (SHQ, 2012 ; SHQ, 1994).....	46
Figure 2-2	Proposed case-study monthly consumption profile (CANMET Energy, 2005 ; Fournier, Communication personnelle). Heating represents most of the global consumption and that its level of consumption depends directly on the temperature outdoors	48
Figure 2-3	Common steps compared for each of the alternatives.....	52
Figure 2-4	Base case scenario - Diamond display	64
Figure 2-5	Environmental scenario - Diamond display	64

Figure 2-6	Social scenario - Diamond display	65
Figure 2-7	Economics scenario - Diamond display	65
Figure 3-1	Représentation du cycle de valorisation entre les déchets combustibles, la gazéification et les activités humaines.....	74

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AHP	Analytical hierachic process
AQLPA	Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique
ARK	Administration régionale Kativik
CBJNQ	Convention de la Baie James et du Nord québécois
FCNQ	Fédération des coopératives du Nouveau Québec
GES	Gaz à effets de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
LEMN	Lieu d'enfouissement en milieu nordique
MADM	Multi-adjective decision analysis
MCDA	Multi-criteria decision analysis
MCDM	Multiple criteria decision making
MODM	Multi-objective decision analysis
O&M	Opération and maintenance
PGMR	Plan de gestion des matières résiduelles
PROMETHEE	Preference ranking organization method for enrichment evaluation
PTÉ	Potentiel technico économique
RSI	Valeur métrique de la résistance thermique
S.É.	Stratégies Énergétiques
SCHL	Société canadienne d'hypothèque et de logement
SHQ	Société d'habitation du Québec

LISTE DES SYMBOLES

a_x	Alternative x
$d_k (a_i, a_j)$	Différence entre les alternatives
f_x	Critère x
p	Seuil de préférence
$P[d_k (a_i, a_j)]$	Index de préférence
q	Seuil d'indifférence
w_k	Poids
$\pi(a_i, a_j)$	Index multicritère
$\Phi^+(a_i)$	Flux sortant
$\Phi^-(a_i)$	Flux entrant
v	Valeur incrémentée (analyse de sensibilité)
v_{min}	Valeur minimum incrémentée (analyse de sensibilité)
v_{max}	Valeur maximum incrémentée (analyse de sensibilité)

INTRODUCTION

Contexte de recherche

Le Québec, par sa vaste étendue, possède une quarantaine de réseaux électriques autonomes desservis par Hydro-Québec. Majoritairement situés dans les régions de la Côte-Nord et du Nord-du-Québec, il s'agit principalement de villages nordiques isolés et des îles. À leurs besoins quotidiens en énergie, il faut ajouter la demande des installations d'exploration et d'extraction minières. Actuellement, tous ces besoins énergétiques sont comblés au moyen de groupes électrogènes diesels. Le coût de production de l'électricité est donc soumis aux variations du prix du baril et l'impact sur l'environnement et la santé des résidents est non négligeable.

Les projets de production d'électricité libre d'énergie fossile commencent à émerger au Nunavik suivant l'exemple des autres provinces du Canada légèrement en avance sur le sujet. L'éolien et le solaire présentent de bons potentiels. En revanche la production d'énergie thermique est un sujet peu ou pas étudié jusqu'à présent dans ce contexte, il s'agit du cœur de ce projet. En effet, deux tiers de la consommation d'énergie des habitations du Nunavik sont destiné au chauffage et il serait inefficace et peu fiable de pallier cette demande par des énergies renouvelables intermittentes. Les solutions techniques pour remplacer les fournaises au mazout existent et continuent de se développer. Les défis dans la mise en place d'une solution différente résident dans l'implantation, les coûts et l'acceptation locale.

Objectif

Le présent mémoire propose de tirer parti des solutions déjà éprouvées de par le monde et n'a pas pour ambition de développer une nouvelle technologie innovante. Le contexte difficile entraîne un nombre élevé de contraintes et d'acteur à impliquer, ce qui complexifie la prise de décision. L'objectif de ce mémoire est d'identifier, d'analyser et de comparer toutes les solutions techniques actuellement disponibles sur le marché pour remplacer l'utilisation du mazout comme source exclusive de chaleur dans les habitations du Nunavik. Pour ce faire, une

revue de littérature des solutions existantes est réalisée et la comparaison des solutions retenues selon une liste de critères définie au préalable est effectuée à l'aide d'une analyse multicritère.

Les sous objectifs de ce mémoire sont : (1) de décrire l'état de l'art actuel sur la production d'énergie thermique en milieu isolé et arctique; (2) de structurer et d'identifier les paramètres de la problématique; (3) de réaliser une étude de cas sur la communauté de Kuujjuaq et enfin (4) d'écrire des recommandations pour guider dans leur décisions les acteurs amenés à développer un tel projet.

Démarche

Pour atteindre les objectifs fixés dans ces travaux, la première étape est de compiler, d'analyser et de compléter les informations disponibles à la réalisation de cette étude. Le contexte nordique du sujet a rendu difficile l'obtention de certaines données et des hypothèses ont été émises afin de pallier au manque. Une fois les informations compilées, celles-ci sont implémentées dans le logiciel Visual PROMETHEE qui applique les méthodes PROMETHEE. Cet outil d'aide à la décision permet d'expliciter les paramètres d'une problématique et de hiérarchiser la ou les solutions les plus adaptées aux objectifs. Par la suite un ensemble d'analyse de sensibilité est réalisée afin d'identifier les limites du modèle et de mesurer l'influence des hypothèses émises pour combler le manque d'information. Enfin l'analyse des résultats et la discussion mettent en perspective les résultats produits par le logiciel et permettent d'établir un certain nombre de recommandation.

Structure du mémoire

Le présent mémoire est divisé en trois parties principales (1) la revue de littérature, (2) l'article scientifique, (3) la synthèse des recommandations. La revue de littérature décrit le contexte dans lequel cette étude a été effectuée, identifie et justifie l'intérêt de la recherche par rapport aux travaux scientifiques réalisés précédemment et enfin explicite le vocabulaire et les concepts traités dans l'article scientifique. L'article a été soumis pour publication au journal Cleaner Production. Enfin, la section sur la synthèse et les recommandations élargit la réflexion

sur les résultats et la discussion de l'article à l'ensemble des sujets traités tout au long de cette maîtrise et explicite les recommandations à fournir aux acteurs pour la mise en place d'un tel projet.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Le Nunavik, un cadre particulier

1.1.1 Portrait

Le Nunavik, situé au-delà du 55^{ème} parallèle nord est la région la plus septentrionale du territoire du Québec (voir Figure 1-1). Territoire occupé par l'être humain depuis plus de 3 000 ans, il est aujourd'hui habité par 14 communautés réparties le long des côtes des baies d'Hudson et d'Ungava qui rassemble une population d'environ 12 000 individus. 90% de cette population est Inuit (Duhaime, Caron et Lévesque, 2015).

Relié au Sud du Québec par aucune route ou voie ferroviaire, le transport est majoritairement assuré par voie maritime durant la période libre de glace qui dure d'Octobre à Avril. Une liaison aérienne est assurée par Air Inuit tout au long de l'année. Cet éloignement géographique entraîne des difficultés logistiques et une faible concurrence dans l'approvisionnement menant à un coût de vie bien plus élevé que pour le reste du Québec (Duhaime, Caron et Lévesque, 2015).

L'économie du Nunavik est divisée en différents types, une économie des ressources, une économie mixte et enfin une économie sociale. La première est le principal moteur financier de la région, il s'agit de l'exploitation des ressources naturelles, principalement par et pour le Sud du Québec. Située près de Salluit, la mine Raglan est l'une des plus importantes exploitations. L'économie mixte allie l'économie de subsistance et l'économie salariale, directement issue d'un mélange entre tradition et modernité, elle permet par exemple de concilier un salaire avec l'achat d'outils pour la chasse et la pêche. Enfin l'économie sociale, contrairement à l'économie marchande, vise à réinvestir le profit directement dans la communauté. Au-delà de la valeur financière des gains, un profit en termes d'emplois générés

ou de formation disponible est considéré comme un apport de richesse dans une communauté. Il existe de forts écarts avec le reste du Québec, le taux de chômage s'élève à 14.1% contre 7.2% dans le reste du Québec et près de 68.8% des inuits n'ont aucun diplôme.

La gestion administrative et politique de la région a un statut particulier qui a été défini avec la signature de la Convention de la Baie James et du Nord québécois (CBJNQ) en 1975 entre le gouvernement du Québec et les représentants Cris et Inuits de la région Nord-du-Québec. Cette convention vise à protéger l'environnement et le milieu social de ces régions ainsi qu'à donner aux communautés une plus grande autonomie.

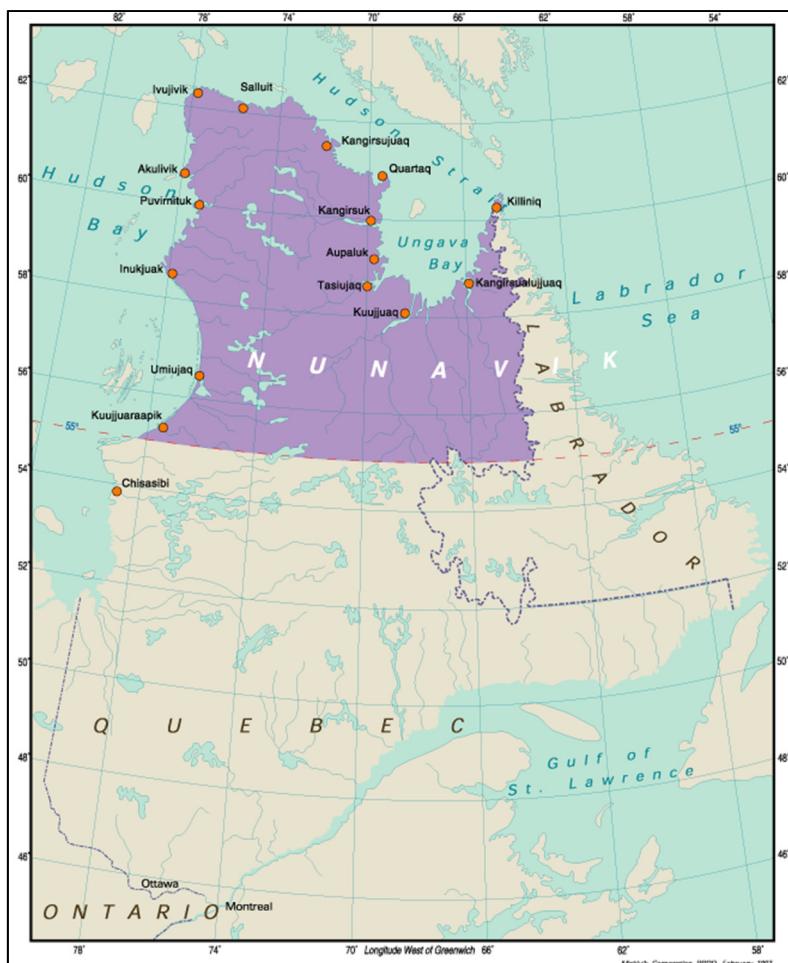


Figure 1-1: Carte d'ensemble du Nunavik
(Makivik Corporation, 2017a)

Au Nunavik, la gestion est divisée en plusieurs entités et un projet tel que le chauffage ne peut être implanté qu'en impliquant chacune d'entre elles. L'encadré ci-après décrit les trois principales structures gérant le Nunavik (Makivik Corporation, 2017b).

Société Makivik

Le mandat de la société Makivik est de protéger les droits et les intérêts des Nunavimmiuts en gérant les relations avec les gouvernements du Québec et du Canada. Elle a pour mission de favoriser le développement économique et social de la société inuite au Nunavik et de faire respecter la convention de la Baie James et du Nord québécois ainsi que l'accord sur les revendications territoriales. C'est elle qui gère les indemnités reçues par les gouvernements.

Administration régionale Kativik (ARK)

L'ARK est responsable de tous les services publics de la région Kativik qui couvre presque entièrement le Nunavik dont le parc immobilier.

Fédération des coopératives du Nouveau Québec (FCNQ)

La FCNQ est un mouvement coopératif qui a été créé en 1967 dans le but d'unir la communauté et de travailler pour l'essor collectif. Elle offre des services variés dans des domaines tel que les biens de consommation, l'hébergement touristique, l'art local, les services postaux et aériens. Actuellement, la FCNQ est seule responsable de la distribution des produits pétroliers.

Dans l'imaginaire collectif le Nunavik est un vaste territoire presque entièrement vide. L'éloignement, le climat et l'étalement des communautés sur tout le territoire rend l'exploitation des ressources naturelles difficile. La végétation est divisée entre la Taïga de l'Est du Bouclier canadien, la Toundra du Bas-Arctique, la toundra du Moyen-Arctique et enfin la Toundra des monts Torngat. Toutes caractérisées par une faible densité de végétaux, le territoire entier du Nunavik est situé au-delà de la limite nordique des forêts attribuables délimité par un comité scientifique à la demande du Ministère des Ressources naturelles du

Québec en 2013 (Jobidon et Bergeron, 2013). Aucun végétal ne peut donc être prélevé ni exploité dans un contexte énergétique. Le réseau hydrique est vaste et complexe mais présente un potentiel limité par l'éloignement entre les communautés entre elles. En revanche le vent et le soleil constituent des sources relativement prédictibles.

La gestion des déchets au Nunavik est une problématique prioritaire en ce moment. La société Kativik a sorti en 2013 un plan de gestion des matière résiduelles (PGMR) visant à améliorer la situation dans chaque communauté (Barrett et Gagné, 2013). Les objectifs sont d'améliorer leurs connaissances sur le sujet, de privilégier des modes de gestion respectant les contraintes du Nunavik, d'assurer un suivi régional dans chaque village tout en limitant les coûts de traitement et de gestion. Différentes mesures de tri sélectif sont prévues, ce qui faciliterait la mise en place d'une valorisation des matières résiduelles combustibles. Une estimation des coûts totaux pour la mise en place du projet s'élève à 1 000 000\$ et seul le financement par les instances gouvernementales permettrait au projet de voir le jour. Dans le cas particulier de Kuujjuaq, un projet de serre a déjà instauré la récupération de matière végétale (Plan Nord, 2017a).

1.1.2 L'habitation au Nunavik

La majorité des habitations au Nunavik est sous la responsabilité de la société de l'habitation du Québec (SHQ). 97% des logements au Nunavik sont loués et près d'un tiers (26.1%) sont surpeuplés (Duhame, Caron et Lévesque, 2015). Le Nunavik est actuellement soumis à une crise du logement due à un manque d'habitats et à la nécessité d'effectuer des opérations de restauration majeures sur le parc immobilier existant. En 2011, 31.4% des logements en ont besoin contre 7.2% dans le reste du Québec (Duhame, Caron et Lévesque, 2015). Cet écart est dû, entre autres, aux exigences du climat, au surpeuplement et à l'éloignement avec le Sud qui entraînent un certain nombre de contraintes (SHQ, 2012):

- Les coûts de construction sont au moins à multiplier par deux car il n'y a quasiment aucun matériau disponible localement et la main d'œuvre spécialisée manque;

- La maintenance est difficile par manque de matériaux et de quincaillerie adéquates;
- Le milieu constamment humide et les infiltrations entraînent des moisissures prématuées;
- La fonte du pergélisol induit une instabilité au niveau des vérins qui soutiennent la maison et peuvent conduire à de grosses fissures au sein de la maison si les niveaux sont trop décalés;
- La sur-habitation de la majorité des logements use prématurément les logements et peuvent causer des problèmes d'hygiène.

La majorité des logements actuels sont issus d'un concept développé par la SHQ dans les années 1980 (SHQ, 2012). Ils sont surélevés du sol avec diverses techniques (vérins, piliers, etc) pour pallier à l'instabilité du sol et limiter les coûts liés à l'excavation. Pour des raisons identiques, aucun réseau souterrain n'existe à ce jour (électricité, eau, vapeur).

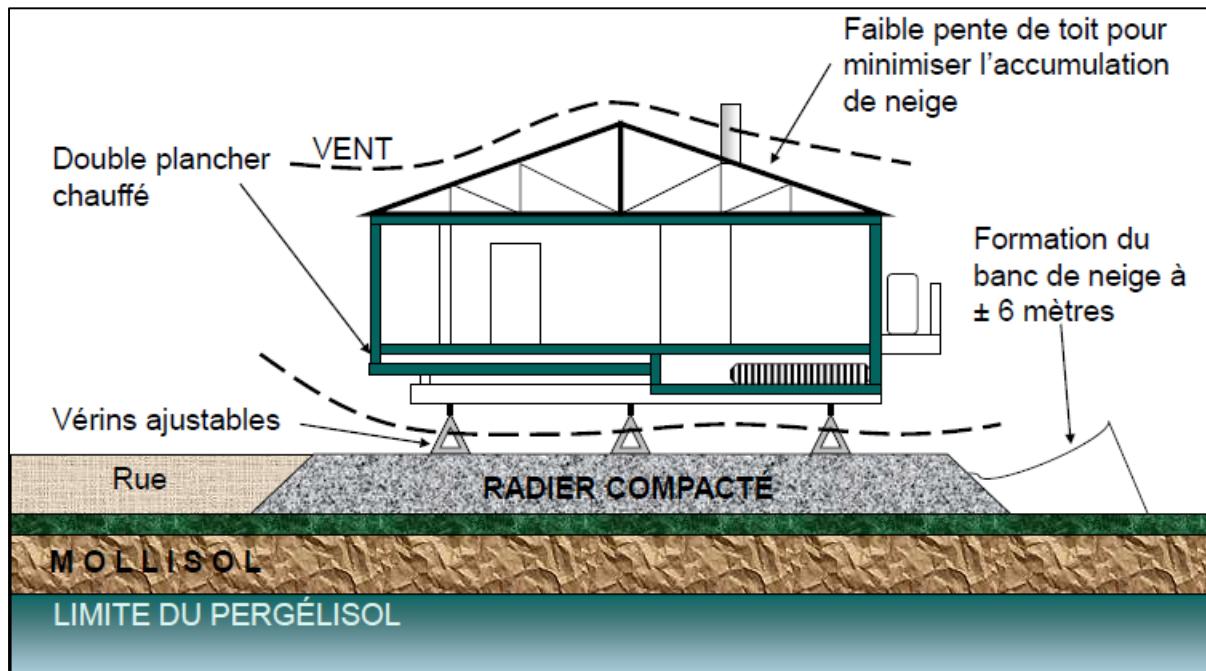


Figure 1-2: Concept d'habitation au Nunavik développé dans les années 80 (SHQ, 2012)

Les résistances thermiques des différents éléments constitutifs d'une maison typique au Nunavik sont comparées aux codes de constructions du Québec dans le Tableau 1-1.

Tableau 1-1: Comparaison des valeurs métriques des résistances thermiques (RSI) des maisons du Nunavik avec les codes de construction du Québec (MERN, 2015 ; Régie du bâtiment du Québec, 2012 ; SHQ, 2012).

Standards	Novoclimat 2.0	Code de construction du Québec	Maisons du Nunavik actuelles
RSI [°C/W]	Toit	10.30	9
	Mur hors sol	4.40	5.11
	Plancher hors sol	5.02	5.2
	Portes	-	1.25
	Fenêtres	0.83	0.63

Les données Tableau 1-1 démontrent que les maisons du Nunavik actuelles sont en deçà des standards appliqués dans l'ensemble du Québec. Hydro-Québec confirme que ces valeurs de résistances thermiques ne sont pas adaptées au climat auquel ces habitations doivent faire face (Hydro-Québec distribution, 2013).

De plus, les statistiques démographiques démontrent une forte natalité et un désir accru des jeunes ménages d'obtenir leur propre logement. Cela augmente la pression sur la pénurie de logement déjà existante des logements (SHQ, 2013).

Enfin, le coût mensuel réel moyen d'un logement est de 3 000\$ et les loyers sont fixés à 560\$, soit subventionnés à 81%. Malgré cela, la situation économique est telle qu'il y a beaucoup d'impayés (Fournier, Communication personnelle). Cela entraîne deux contraintes majeures pour les projets d'efficacité énergétique et de production d'énergie propre : (1) le loyer inclus des charges fixes ce qui rend complètement opaque le réel coût de l'énergie aux habitants, (2) les problèmes d'impayés font priorité sur les projets d'innovations.

1.1.3 L'énergie au Nunavik

L'ensemble de la demande énergétique du Nunavik est aujourd'hui fourni par des sous-produits du pétrole. L'électricité est produite grâce à des centrales thermiques utilisant des

groupes électrogènes diesel gérés par Hydro-Québec (2011). Ces centrales ont l'avantage d'utiliser une technologie simple et éprouvée demandant relativement peu d'entretien tout en fournissant de l'énergie de façon permanente. Les inconvénients majeurs résident dans le prix et le transport du combustible et la pollution atmosphérique et sonore qu'elles engendrent. Le chauffage des espaces et de l'eau est à prédominance mazout, gérée indépendamment et de manière décentralisée, chaque habitation ou ensemble d'habitations possède une chaudière et dans la plupart des habitations unifamiliales des fournaises à air chaud (Hydro-Québec distribution, 2011). Les huiles de chauffage (mazout léger) et le carburant des véhicules sont gérés par la fédération des coopératives du nouveau Québec (FCNQ) qui comprend 14 coopératives membres des communautés inuites. La société Makivik et l'administration régionale Kativik ont mis en place une subvention importante pour l'essence distribuée au Nunavik. Une réduction de 0.40\$/L est applicable à tous les bénéficiaires de la convention de la Baie James et du Nord Québécois mais le prix reste deux fois plus élevé que dans l'ensemble du reste du Québec.

La majorité des centrales actuelles sont en exploitation depuis une trentaine d'années et nécessitent des investissements majeurs afin d'assurer leur bon fonctionnement. L'ensemble des centrales thermiques établies au Nunavik comptabilise une puissance de 23.4MW. À Kuujuaq, la centrale a une capacité de 6.6MW (Hydro-Québec distribution, 2011) ce qui correspond à environ 4 800 000L de diesel brûlé par an (RNCan, 2013a), soit 12 400T de CO₂ rejetées dans l'atmosphère pour la seule production d'électricité.

En 2011, Hydro-Québec a réalisé une étude sur le potentiel technico-économique (PTÉ) d'efficacité énergétique dans l'ensemble des réseaux autonomes à la demande de la régie de l'énergie du Québec (Hydro-Québec distribution, 2013). La portée de cette étude se limite à l'implantation de mesures qui ne posent pas de problèmes techniques et dont le coût unitaire est inférieur ou égal au coût évité à Hydro-Québec. Les travaux révèlent que 50% du PTÉ d'efficacité énergétique de la totalité du réseau autonome porte sur le chauffage des locaux et de l'eau et 40% provient des utilisations d'appareils électroménagers, électroniques et d'éclairage. Le PTÉ d'économie du mazout se concentre à 60% au Nunavik en raison de la

prédominance du chauffage au mazout et statue que 48 262MWh pourraient être évités dans un horizon à 5 ans. Les recommandations pour atteindre cet objectif portent principalement sur l'amélioration de l'isolation et la récupération de chaleur (e.i. eaux de drainage, air évacué). Concernant les économies d'électricité au Nunavik, il s'agit de diminuer la consommation des appareils et avant tout des ampoules ainsi que de modifier certaines habitudes comme de laisser le téléviseur constamment allumé. La ventilation introduite peu à peu est aussi sujet à amélioration par manque d'information. De plus, un sondage auprès de la population réalisé par Opinion Impact Inc. (2015) relèvent certains aspects quant aux habitudes de consommation énergétique chez les Nunavimmiuts. Le premier point d'importance est que la notion « d'économie de l'énergie » qui ne veut rien dire de concret pour la majorité des gens car le fait que l'électricité soit un produit fabriqué dans la centrale du village reste mal comprise d'un côté et invisible d'un autre car la majorité des gens interrogés, en location, ne voient jamais de facture liée à la consommation d'énergie. En revanche, la culture Inuite valorise beaucoup l'économie (par opposition au gaspillage) et l'esprit communautaire est fort, ces deux valeurs peuvent servir de base pour faire comprendre les côtés avantageux pour l'ensemble de la communauté.

Au Québec, 94% de l'électricité est produite à partir des barrages hydroélectriques et le Canada est reconnu mondialement pour son expertise dans le domaine (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2006). Néanmoins cette solution n'est pas appliquée au-delà du 50^{ème} parallèle, car un projet de grande ampleur ne serait économiquement pas viable en raison, entre autres, de l'éloignement et de la rigueur du climat. Une centrale hydroélectrique à petite échelle pourrait être envisagée en fonction des ressources proches de chaque communauté. Les rivières sont nombreuses et les études démontrant leur potentiel qui ont été réalisées par Hydro-Québec (2001) entre 1975 et 1982 indiquent que plusieurs d'entre elles sont propices à leurs installations. Des travaux sur les meilleures stratégies d'électrification des zones rurales dans les pays en voie de développement, exposent clairement les bénéfices que l'on peut retirer avec un système d'hydroélectricité à petite échelle (Dimitriou, Kotsampopoulos et Hatziargyriou, 2014). Cette option permet de générer de l'énergie en continu, elle ne nécessite pas de gros coûts d'investissement et peut être entièrement gérée par la communauté ce qui conduit à

l’indépendance. En revanche, la mise en place de telles structures engendre des coûts élevés d’investissements et d’entretien des structures particulièrement élevés à cause du climat rigoureux et peuvent être contrariés par les gels saisonniers.

L’utilisation du courant des marées et des océans pourrait également être envisagée. Hydro-Québec estime que le potentiel théorique du Québec s’élève à 4 288MW et 97% serait situé près de la baie d’Ungava (située au Nord du Nunavik, voir Figure 1-1). Très éloigné du réseau, ce potentiel n’est pas exploité car la filière hydrolienne est toujours en phase de recherche et développement au Québec (Hydro-Québec, 2017a). Il s’agit d’une technologie encore très coûteuse et l’implantation est à haut risque (Lefevre, 2016). À l’heure actuelle, le Canada compte une centrale marémotrice en Nouvelle Écosse d’une capacité de 20MW et prévoit des projets pilotes en Colombie Britannique et en Nouvelle Écosse (RNCan, 2016). Ces projets sont à suivre avec attention car ils devraient pouvoir fournir bientôt des solutions viables et pertinentes.

La géothermie est également une technologie en plein développement au Québec. Majorowicz et Minea (2015) ont réalisé pour Hydro-Québec une évaluation de l’impact géologique, économique et environnemental de l’implantation de centrales géothermiques au Québec. Ils statuent que la vallée du Saint-Laurent, incluant la Gaspésie et les îles de la Madeleine et d’Anticosti, présente un potentiel intéressant pour la géothermie profonde. Cependant, au-delà du 49^{ème} parallèle, la valeur moyenne annuelle de la température de surface est relativement basse avec une moyenne de flux thermique à 40mW/m². Les travaux de forage seraient nettement trop conséquents pour obtenir de bons résultats.

Dans la littérature scientifique, seule une étude a été réalisée sur le potentiel des énergies renouvelables au Nunavik et là encore les informations discutées proviennent directement d’une présentation donnée en 2006 par Hydro-Québec (Claisse et Briand, 2007). À ce jour aucune étude indépendante réalisée n’a été rendue publique.

Par ailleurs des projets d'implantation d'énergie renouvelable au Nunavik sont en discussion depuis des années, les potentiels en ressources éoliennes et solaires sont connus et les avancées technologiques suivies de près à travers les dossiers de la régie de l'énergie. L'encadré ci-dessous fait état de quelques projets et rapports importants des développements dans les réseaux autonomes du Québec.

- 1986 – Installation d'une éolienne à axe horizontal d'une puissance de 65kW à Kuujjuaq qui a depuis été démantelée (Hydro-Québec, 2017b).
- 2007 – La régie de l'énergie approuve la construction d'une nouvelle centrale thermique à Kuujjuaq. Un projet de Jumelage éolien-diesel a été discuté puis finalement écarté (Anon, 2007).
- 2011 – Ouverture de la nouvelle centrale thermique à Kuujjuaq.
- 2015 – Hydro-Québec lance un appel de propositions pour un parc éolien d'une puissance de 6MW à intégrer au réseau autonome des îles de la Madeleine. La mise en service est prévue pour 2020 (Hydro-Québec distribution, 2016).
- 2015 – Un rapport préparé pour Stratégies Énergétiques (S.É.) et l'Association québécoise de Lutte contre la Pollution Atmosphérique (AQLPA) démontre les potentiels photovoltaïques au Nunavik et illustre les données avec la liste des projets existants au Nunavut, dans les territoires du Nord-Ouest et dans le Yukon. Ce rapport recommande à la régie de requérir une étude complète sur les possibilités du photovoltaïque en réseaux autonomes avant le dépôt de son prochain plan d'approvisionnement 2017-2026 (Deslauriers, 2015).
- 2016 – Hydro-Québec sort son plan d'approvisionnement 2017-2026 sans faire mention du photovoltaïque mais prévoit des appels de propositions ouverts pour tous les réseaux du Nunavik en deux phases : Phase 1 – Est et Phase 2 – Ouest (Hydro-Québec distribution, 2016).
- 2016 – Hydro-Québec lance un appel de proposition visant la production d'énergie électrique à base de biomasse forestière pour la communauté d'Obedjiwan (Hydro-Québec distribution, 2016).

2017 – Annonce du développement d'un projet pilote de valorisation énergétique des matières résiduelles et de serre commerciale à Kuujjuaq dans le cadre du plan Nord (Anon, 2017).

De plus, un plan de développement, le « plan Nord », offre un contexte de développement économique ambitieux qui se veut axé sur le développement durable qui prévoit l'ouverture de mines, le développement de projet d'énergie renouvelable et la construction d'infrastructures de transport (Plan Nord, 2017b). Là encore les projets sont plus orientés sur la production d'énergie électrique et sur l'efficacité énergétique que l'énergie thermique. Si on reprend les conclusions des études sur le PTÉ des réseaux autonomes réalisés par Hydro-Québec en 2011 (Hydro-Québec distribution, 2013), le chauffage au mazout au Nunavik représente une énorme bête noire et il est essentiel de travailler sur des solutions alternatives.

1.1.4 Barrières à surmonter

Le contexte de ces communautés, lieux ou exploitations éloignées entraînent un certain nombre de défis à surmonter. Plusieurs études se penchent sur cette problématique et vont au-delà des barrières les plus évidentes telles que les conditions climatiques extrêmes, l'éloignement et les barrières sociales.

T. M. Weis et al. (2008) a réalisé un sondage auprès d'un groupe d'individus représentant tous les corps de métiers amenés à travailler ensemble lors de la mise en place d'une centrale mixte éolien/diesel dans une communauté isolée du Nord du Canada. Les différents acteurs interrogés sont les fabricants industriels, les chercheurs, les fournisseurs d'énergie, les développeurs de projets et enfin les employés des gouvernements. Les résultats démontrent une certaine disparité dans les points de vue cependant les quatre premiers aspects jugés les plus difficiles à surmonter sont identiques : les coûts initiaux, les coûts d'opération et de maintenance, la perception sur les risques techniques (\neq risques techniques réels) et enfin l'accès au matériel et à la main d'œuvre. Une autre étude en Russie réalisée par A. Boute (2016) rappelle

également que les obstacles ne sont pas forcément technologiques mais plutôt juridiques et politiques. Enfin l'étude de J. Krupa (2012) met l'emphasis sur le contexte particulier des premières nations au Canada et rassemble les barrières en six grands aspects : les coûts, la disponibilité des compétences, la vision à long terme, les circonstances, le manque de légitimité et le manque d'égalité.

1.2 Production thermique en milieu isolé

La production d'énergétique en milieu isolé est un domaine de recherche et développement qui s'est accéléré au cours du siècle dernier. Dans de nombreuses régions du monde, l'accès à l'énergie dans les zones rurales reste un problème d'actualité. Quel que soit le contexte géographique, politique et économique du pays développé la problématique reste similaire, il est difficile de rallier chaque village au réseau principal du pays. L'éloignement entraîne des coûts et des difficultés supplémentaires que les gouvernements ne sont pas prêts à assumer. La grande majorité de ces lieux isolés ayant recours à l'énergie, l'ont au moyen de groupe électrogènes alimentés au diesel (Mazzola, Astolfi et Macchi, 2015). La littérature scientifique est prolifique dans le domaine de la production électrique en milieu isolée, en revanche la majorité de ces études ne traitent pas de production thermique (Rashid et al., 2015 ; Rojas-Zerpa et Yusta, 2015 ; Catalina, Virgone et Blanco, 2011). Les travaux de Stephen et al. (2016) présentent une étude de cas intéressante sur l'implantation de chauffage à la biomasse dans un village autochtone de Colombie Britannique.

La production d'énergie thermique telle que traitée dans ce mémoire peut être classée en deux catégories en fonction de l'origine de la matière première : les énergies fossiles et les énergies issues de la biomasse. Selon le ministère des ressources naturelles du Canada, la biomasse peut être définie comme « *une matière biologique solide, liquide ou gazeuse, qui a emmagasiné de la lumière du soleil sous forme d'énergie chimique. Cette définition exclut toute matière organique transformée au cours de très longues périodes de temps par des processus géologiques en des matières premières telles que le charbon ou le pétrole* ». Cela comprend

l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Par opposition, les combustibles fossiles représentent cette même matière biologique transformée après des millions d'années de changement géologique.

1.2.1 Combustibles fossiles

Les combustibles fossiles comprennent majoritairement le pétrole, le gaz naturel et le charbon qui sont des matières naturellement présentes dans le sous-sol de la terre. Contenant une forte concentration de carbone, ils sont d'excellents carburants et ont l'avantage d'être facilement stockés et transportés, c'est pourquoi ils fournissent aujourd'hui 85.9% de l'énergie mondiale (World Energy Council, 2016). Cependant, ils présentent deux inconvénients majeurs : (1) ils sont considérés comme non renouvelables car leur formation prend des millions d'années; (2) en brûlant ils dégagent les fortes concentrations de carbone accumulées dans la terre pendant ces millions d'années, perturbant ainsi l'équilibre du cycle carbone établit sur la planète (IEA, 2017a).

Selon le conseil mondial de l'énergie (2016), le pétrole et le gaz naturel à eux deux fournissent plus de la moitié de la demande mondiale, respectivement 32.6% et 22%. Le charbon quant à lui fournit près de 40% de l'électricité, majoritairement en Asie. En réponse au désir de transition vers des énergies plus propres, le charbon est le secteur le plus ciblé et tend à décroître. En revanche, grâce à son emprise sur le secteur des transports la demande en pétrole n'est pour l'instant pas en décroissance car les alternatives ne sont pas encore concluantes et les politiques d'économies n'ont pas de réel impact sur la croissance de la demande (BP, 2017). Enfin, le gaz naturel étant doté d'une image plus verte en raison de ses émissions GES moindres, sa consommation tend à augmenter (World Energy Council, 2016).

Au Canada, la répartition entre les différentes sources d'énergie favorise également les énergies fossiles. Le Tableau 1-2 présente la part de ces différentes sources d'énergie, celle des énergies fossiles s'élève à 75.6%. Il est intéressant de noter que seuls 9.8% du total proviennent

de l'hydroélectricité et que la majorité de cette production vient de la province du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2006).

Tableau 1-2: Répartition de la consommation d'énergie primaire par source au Canada en 2005, données issues de RNCAN 2006
(Paré et al., 2011)

	Énergie (Ej)	% du total
Total	12,25	100
Pétrole	4,59	37,5
Gaz naturel	3,44	28,1
Charbon	1,22	10,0
Nucléaire	1,04	8,5
Hydroélectricité	1,20	9,8
Biomasse	0,59	4,8
Résidus de biomasse industriels (pâtes et papiers)	0,46	3,9
Bois de chauffage résidentiel	0,11	0,9

Par ailleurs, le coût du pétrole dépend de l'offre et la demande mondiale et s'avère très instable. Tel que le démontre la Figure 1-3, en quelques années seulement le prix du baril peut augmenter de plus de 70\$, voir en quelques mois, augmenter de plus de 100\$. Cette instabilité rend vulnérable ceux qui dépendent uniquement de cette ressource.

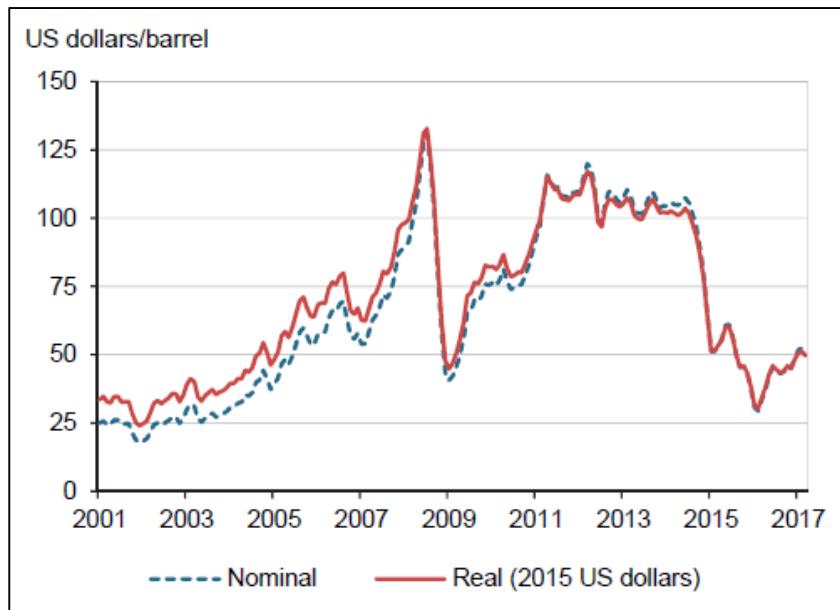


Figure 1-3: Coût nominal et réel des importations de pétrole brut (moyenne IEA) (IEA, 2017b)

1.2.2 Combustibles issus de la biomasse

La valorisation de la biomasse pour produire de l'énergie, dite « bioénergie », est un domaine qui comprend à la fois des solutions vieilles comme le monde (i.e. se chauffer au feu de bois) et des technologies à la pointe (i.e. pyrolyse). Dans un contexte de transition vers des énergies renouvelables pour limiter l'impact sur la planète, il s'agit d'un domaine en constante expansion. La biomasse est caractérisée par une composition contenant moins de carbone et plus d'oxygène que les combustibles fossiles. Sa capacité calorifique, directement liée à sa composition, est inférieure. La Figure 1-4 illustre le pouvoir calorifique des combustibles les plus courants.

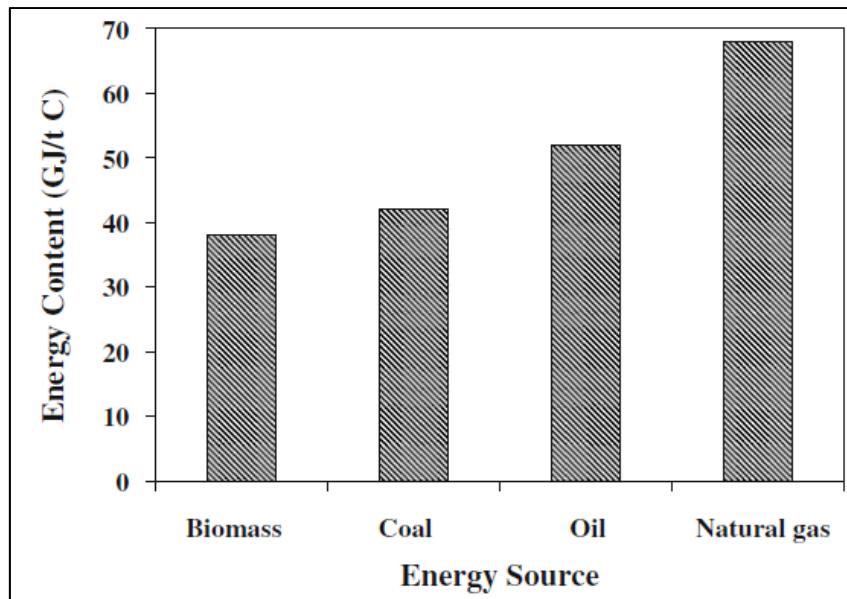


Figure 1-4 : Comparaison du contenu en énergie des sources d'énergies les plus communes (Surisetty, Kozinski et Dalai, 2012)

Les deux voies de valorisation de la biomasse sont la combustion par énergie directe (thermochimie) et la dégradation biologie par méthanisation. Celles-ci se différencient par la nature des combustibles concernés. Pour la combustion directe, il d'agit de matière sèche telle que le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles alors que la méthanisation traite les matières putrescibles telles que les déchets ménagers, le fumier et les lisiers d'animaux, les boues de station d'épuration, le carton et les papiers. Ces matières ne sont citées qu'à titre d'exemple et peuvent aller d'une catégorie à l'autre tant en fonction de la disponibilité des matières et du dimensionnement de la technologie utilisée (Solomatnikova, 2012). Il est considéré que la quantité de déchets putrescibles disponibles dans les communautés nordiques est difficilement accessible (tri) et insuffisante pour choisir l'option de la méthanisation.

La Figure 1-5 explicite les technologies de conversion thermochimique existantes pour valoriser la biomasse. Le choix entre ces technologies se base, entre autres, sur la quantité et la qualité de la biomasse disponible, sur le type d'énergie requis et sur la complexité et les

coûts associés au projet (Solomatnikova, 2012). Les différentes formes de transformation peuvent créer de la chaleur, du gaz de synthèse, du biocharbon ou encore de la biohuile.

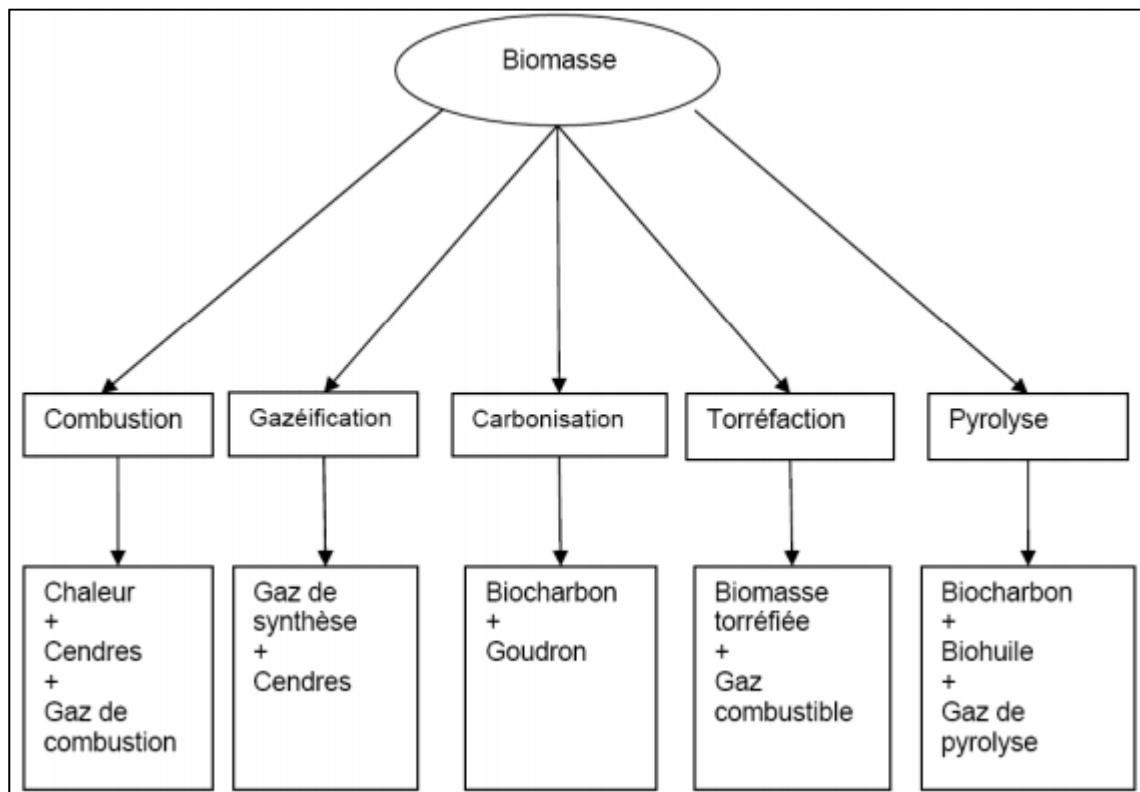


Figure 1-5 : Conversion thermochimique de la biomasse (Solomatnikova, 2012)

En 2016, Canmet Energy comptabilise pas moins de 275 projets de chauffage à la biomasse avec en tête les provinces de Québec et de la Colombie Britannique (Madrali, 2016). On observe dans la Figure 1-6 qu'aucun projet n'a été comptabilisé au Nunavik mais que les territoires du Nord-Ouest et le Yukon ont mis en place plusieurs projets. Pour reprendre les mots de Madrali, « un projet réussi avec succès mène à d'autre projets ». Dans les projets avancés, ceux de Behchoko, Fort Providence et Yellowknife sont des exemples de la capacité des territoires du Nord-Ouest à mettre en place des systèmes de chauffage centraux alimentés par des granules ou des écorces de bois (Arctic Energy Alliance, 2013).



Figure 1-6: Répartition des projets de chauffage à la biomasse sur le territoire du Canada (Madrali, 2016)

Le secteur le plus concerné par ces projets est le secteur institutionnel suivis par les fermes et les serres, les réseaux de chaleur urbains et les petites industries. Les combustibles les plus couramment utilisés sont les granules de bois suivis des copeaux de bois. L’industrie est en pleine croissante et est influencée par le désir d’indépendance à l’égard des huiles de chauffage, le développement de la réglementation et l’augmentation d’implantation d’acteurs dans le domaine.

En matière de création de richesse collective, la filière de la chaleur à la biomasse se positionne avantageusement par rapport aux autres sources d’énergie renouvelable. Elle crée annuellement plus d’emplois en construction et en opérations, elle est moins coûteuse par MW de puissance installée et elle a un coût de revient au kWh compétitif par rapport à d’autres filières énergétiques (FQCF, 2013).

Enfin, le bilan carbone de la valorisation de la biomasse peut être considéré comme nul car le CO₂ libéré lors de la combustion est équivalent à celui emmagasiné par l’arbre toute sa vie.

Cependant cette notion de « carbo-neutralité » a suscité plusieurs débats pour les trois raisons suivantes :

- Les émissions de CO₂ par combustion de bois sont plus élevées que pour les combustibles fossiles par unité d'énergie libérée;
- La libération du CO₂ par combustion est beaucoup plus rapide que par décomposition;
- La séquestration du CO₂ dans les forêts n'est pas instantanée.

C'est pourquoi il faut considérer un certain temps avant d'observer des bénéfices en termes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (RNCan, 2013b ; Laganière et al., 2017). Cette période peut être très variable en fonction de la source de bois utilisée et du transport entre la récolte et le lieu de consommation.

1.2.3 Recherches et travaux

En matière de production d'énergie en milieu isolé, la littérature est assez prolifique en ce qui concerne la production d'électricité aux dépends de la production de chaleur en réponse à un réel besoin dans le monde. Plus de 1,6 milliards de personnes n'ont pas accès à l'électricité, 80% d'entre eux vivent dans les régions rurales d'Afrique et d'Asie (Mohammed, Mustafa et Bashir, 2014). Cette réalité affecte le cœur même de toute forme de développement dans ces régions et entrave la vie quotidienne. Cela va de la difficulté de faire ses devoirs une fois la nuit tombée à l'inaccessibilité de toute forme de modernisation pour une petite exploitation agricole ou autre entreprise. L'éloignement de ces régions rend infaisable la connexion au réseau national et l'électricité issue des centrales thermiques au diesel tendent à devenir chère tandis que les énergies renouvelables deviennent de plus en plus compétitives. Plusieurs revues de littérature rendent compte de la situation actuelle sur le développement des systèmes d'énergie renouvelable hybrides hors réseau et les obstacles à surmonter lors de leur implantation. Celles-ci débattent du niveau d'intégration des différentes sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, biomasse, géothermique, hydro..etc) et démontrent l'intérêt d'utiliser une solution hybride pour pallier aux imperfections de chacune des solutions (Mohammed, Mustafa et Bashir, 2014 ; Siddaiah et Saini, 2016). Le choix de la source

d'énergie dépend de sa fiabilité et de l'économie des composants. Le côté aléatoire de certaines de ces ressources naturelles tout au long de l'année demande une exploitation optimale de la ressource et une configuration qui peut satisfaire la demande de manière continue et consistante (Siddaiah et Saini, 2016). Les exemples ne manquent pas et ces travaux sont à parcourir pour obtenir plus d'informations sur les réseaux de production électrique hybrides. L'unique étude mentionnée concernant la production de chaleur traite d'une étude expérimentale sur une serre située en Turquie (Esen et Yuksel, 2013). Cette étude est intéressante mais ne peut être utilisée dans le cadre des travaux de ce mémoire car le contexte diffère totalement.

Dans les régions arctiques, les conditions climatiques extrêmes ajoutent un paramètre non négligeable à prendre en compte. Le climat peut être imprévisible et augmenter les risques lors du transport et du stockage du diesel. Les travaux de Boute (2016) sur les régions isolées de Russie témoignent parfaitement de ce contexte particulier à prendre en compte.

Au-delà de la production d'énergie thermique, l'efficacité énergétique doit être considérée en priorité pour les projets dont le chauffage occupe une part si importante. Comme évoqué dans le portrait des habitations au Nunavik, il est important de garder en tête que les maisons actuelles ne sont pas performantes et que la limitation de la consommation est à considérer en premier lieu. L'efficacité thermique des maisons en climat Arctique et Antarctique fait l'objet de recherches actives dans un certain nombre de pays. Le contexte européen, plus restrictif (European parliament, 2010), a même nettement encouragé cette voie et fait émerger des instituts de recherche tel que le ZEB en Norvège qui ne traite que des bâtiments Net Zéro dans un contexte nordique (ZEB, 2017). Les exemples de bâtiments à faible consommation énergétique dans des conditions climatiques extrêmes ne manquent pas.

Princess Elisabeth Antarctica (International polar foundation, 2016)

Située au 71^{ème} parallèle Sud, il s'agit de la première station de recherche polaire zéro émission. Mise en place par le gouvernement Belge, le bâtiment est extrêmement bien isolé et orienté de façon optimale. Équipé d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques et de collecteurs solaires, les

contrôleurs intelligents permettent de tirer un maximum de profit de ce micro-réseau. Enfin le traitement des eaux fonctionne en boucle fermée, les eaux grises et noires sont 100% réutilisées.



Figure 1-7: Vue sur la station Princesse Élisabeth

Projet Riverdale Net zéro (Equilibrium, 2008)

Parmi les 12 projets de maisons durable de démonstration mis en place par la société canadienne d'hypothèque et de logement (SCHL), le projet Riverdale représente l'expérience la plus au Nord car située à Edmonton (53^{ème} parallèle Nord). La maison installée est entièrement réalisée avec des matériaux respectueux de l'environnement et est équipée de systèmes solaires passif et actif pour subvenir aux besoins en énergie. Les résultats démontrent que la demande en chauffage est réduite de 75% par rapport à la moyenne nationale.



Figure 1-8: Vue sur la résidence Riverdale

Polardo (Steinsvik Arkitektkontor AS, 2004)

Développé dans les années 80, ce projet de résidence à vue le jour en 1994 à Tromø en Norvège (69^{ème} parallèle Nord). Spécialement dessiné afin de contrer les défis du climat arctique, le bâtiment est toujours en place. Ce projet a été l'un des premiers à être mis en place en Norvège, depuis les initiatives se sont multipliées chez les architectes scandinaves (i.e. I-Box 120 et Sotrelva).



Figure 1-9: Vue sur les résidences I-box 120

Dans les travaux scientifiques effectués sur ce type de bâtiments, les travaux de Chen *et al.* (2012) qui publièrent sur les bâtiments durables dans les régions froides mettent en avant l'importance d'une enveloppe performante et l'intérêt d'utiliser les technologies solaires intégrées aux bâtiments. Les résultats démontrent qu'il est possible de gagner en efficacité énergétique et de produire de l'électricité tout en restant compétitif dans les régions éloignées du Canada où le coût de l'électricité est plus important que dans le reste du pays. Les études de Vladykova P. *et al.* (2012) méritent une attention particulière car en plus de mettre en place une maison à faible consommation à Sisimiut au Groenland (67^{ème} parallèle Nord), celle-ci fut instrumentée pendant 5 ans. Les résultats montrent qu'ils n'ont pas atteint leurs objectifs de réduction de la demande en chauffage à 80kWh/m²/an mais les leçons apprises sont très instructives et aujourd'hui encore aujourd'hui la maison sert de modèle.

Les recherches mentionnées ci-dessus sont concentrées sur la production électrique et sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Ces aspects sont d'une importance capitale et

l'amélioration des conditions de logements d'un point de vue écologique, social et économique doivent obligatoirement les prendre en compte. La production électrique à l'aide d'énergie renouvelable locale telles que le vent ou le soleil est, à terme, la seule façon d'obtenir une autonomie totale. En revanche, les investissements et les travaux que cela implique sont d'une importance que les communautés ne sont pas prêtes aujourd'hui à assumer. C'est pourquoi l'objet de ce mémoire vise à comparer et analyser différentes solutions qui pourraient améliorer la production d'énergie thermique à court et moyen termes dans un cadre réaliste.

1.3 Les méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision

Comme évoqué dans l'introduction, l'approche choisie pour ces travaux est l'analyse multicritère d'aide à la décision pour pouvoir prendre en compte les contraintes du contexte particulier du Nunavik vu dans les chapitres précédents. Le chapitre 1.2 fait l'inventaire des solutions existantes et démontre que l'amélioration de la situation actuelle ne passe pas par l'invention d'une nouvelle technologie mais par le choix de la solution existante qui sera la plus proche de répondre à tous les objectifs fixés.

1.3.1 Généralités

Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) furent introduites dans les années 1970 en réponse à un besoin d'aide dans la prise de décision complexe. Plusieurs écoles ont émergées dans le domaine et elles pourraient se diviser en deux groupes : (1) les méthodes d'aide à la décision multi-objectifs (MODM) et (2) les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM) (Pohekar et Ramachandran, 2004). Chacune de ces catégories regroupent plusieurs types de méthodologies qui ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients en fonction du domaine d'application. Les points communs entre toutes ces méthodes sont qu'elles présentent des critères en conflit, des unités incomparables et de la difficulté dans le choix des alternatives.

Dans le cas des MODM, le nombre d'alternatives envisagées n'est pas fini et le but est d'optimiser la liste d'objectifs en une série de contraintes. L'alternative la plus qualifiée par rapport à ces contraintes est retenue. À l'inverse, en utilisant la méthode MADM, un petit nombre d'alternatives est sélectionné et discuté. La présente problématique comporte un nombre fini d'alternatives, la méthode employée fait donc partie des MADM.

Dans la littérature, plusieurs classifications des méthodes d'aide à la décision existent mais la plupart identifient trois groupes de MADM : (1) mesure de la valeur (notation de chaque alternative); (2) modèles de but, d'aspiration ou de niveau de référence (des niveaux de réussite sont établis pour chaque critère et le procédé recherche la ou les solutions les plus proches des objectifs à atteindre); (3) les méthodes de surclassement. La Figure 1-10 résume la classification des MCDM selon Belton et Stewart (2002) et donne quelques exemples d'algorithmes développés pour chacune des méthodes.

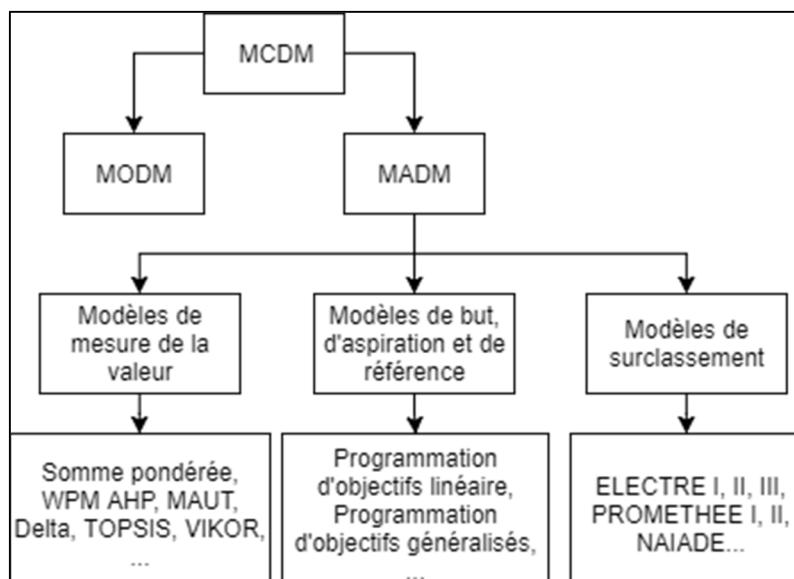


Figure 1-10: Classification des méthodes d'analyse d'aide à la décision selon (Belton et Stewart, 2002)

Le processus d'aide à la décision multicritère comporte quatre phases (Bouzarour-Amokrane, 2013):

- L'identification

La phase d'identification est centrée sur la définition du problème. Il s'agit de distinguer les différents acteurs impliqués tout au long du processus de résolution du problème (jusqu'à l'implantation de la ou les solutions). Une fois ces acteurs identifiés il s'agit de clarifier les objectifs, les alternatives et les enjeux du problème. Cette phase correspond à la collecte de données nécessaires à la résolution du problème. La définition de la famille de critère est critique dans la phase d'identification du problème. Celle-ci doit respecter trois principes : l'exhaustivité, la cohésion et la non redondance (Henriet, 2000).

- La modélisation

La structure du problème doit être modélisée en fonction de la nature des résultats désirées. Comme illustré dans la Figure 1-11, le problème peut être un problème de choix, de classification (typologie), de classement (rangement) ou de tri.

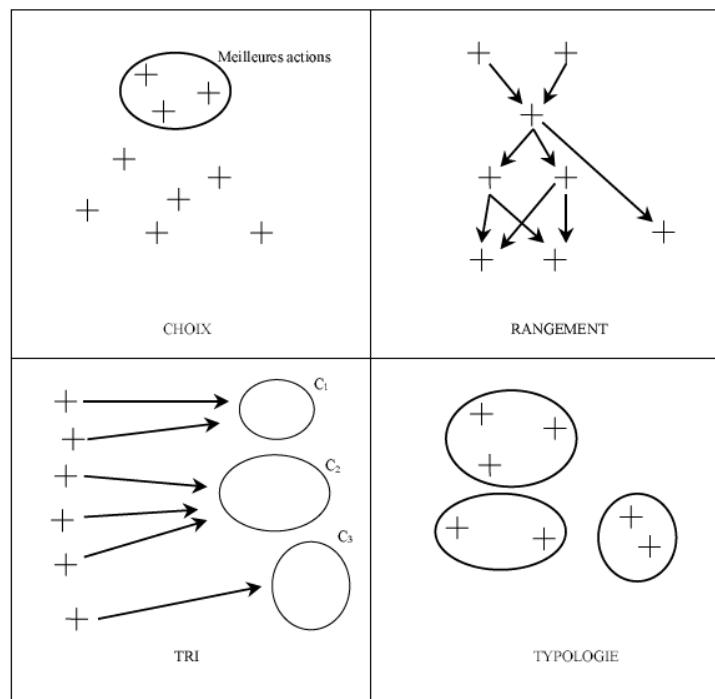


Figure 1-11: Les différentes problématiques en analyse multicritère (Henriet, 2000)

Un problème de tri évalue ces alternatives de manières absolues alors que les problèmes de rangement et de choix comparent les alternatives les unes aux autres en fonction des attributs.

- L'évaluation et l'analyse

Cette phase correspond à l'évaluation de chaque alternative en fonction de la structure choisie à la phase précédente. Il s'agit de quantifier le degré d'atteinte des objectifs de chaque alternative en fonction de l'ensemble des attributs définis. Cette capacité à remplir l'objectif peut être mesurée sur une échelle ordinaire ou mesurable. La pondération (agrégation) des attributs par une évaluation individuelle de chaque acteur permet de mesurer l'importance des critères par rapport aux objectifs. Il est important que le modèle utilise les informations correctement et que les résultats soient compris par toutes les parties prenantes.

- Les recommandations

Cette dernière phase comprend une analyse de sensibilité et de robustesse afin de renforcer la validité des résultats. Les recommandations rédigées doivent prendre en compte du contexte organisationnel, culturel et ethnique afin de convaincre les personnes concernées et permettent la mise en œuvre des recommandations effectuées.

1.3.2 Choix de la méthode

De nombreux travaux dans le domaine de l'énergie utilisent des méthodes multicritères car celles-ci permettent de prendre en compte la multiplicité de facteurs dans un contexte changeant. Comme évoqué précédemment, une multitude de méthodes existent et chacune a sa particularité, ses objectifs, ses forces et ses faiblesses. Dans le but de populariser cette approche, certaines études se focalisent sur la comparaison des méthodes et outils associés afin de faciliter le choix d'un chercheur intéressé. Parmi ces travaux, trois de ces études m'ont permis de choisir la méthode la plus adaptée à ma problématique, mes ressources et le contexte de mon projet.

Pohekar et Ramachandran (2004) ont effectué une revue de plus de 90 publications qui utilisent les méthodes d'analyse multicritères dans le domaine de la planification énergétique. L'objectif de leur étude était de classer ces publications par méthode utilisée et domaine d'application afin d'évaluer les méthodes les plus utilisées. Les conclusions montrent que l'AHP (Analytical hierarchic process) est la technique la plus populaire suivie des méthodes de surclassement ELECTRE et PROMETHEE.

Plus spécifiques, Buchholz et al. (2009) ont comparé quatre outils d'analyse multicritères en réalisant une étude de cas pour des systèmes de production bioénergie en Ouganda. Les quatre logiciels comparés utilisaient les méthodes suivantes : AHP, Delta, PROMETHEE II et NAIADE. Les deux premières sont des méthodes de mesure de valeur et les deux suivantes sont des méthodes de surclassement. Neuf critères ont été évalués afin de comparer ces méthodes:

- L'intégration des acteurs dans le processus de prise de décision;
- La possibilité de prendre en compte des données qualitative;
- Les mesures gérer les incertitudes;
- L'intégration d'une hiérarchie dans les critères;
- L'utilisation de seuils;
- L'expérience utilisateur;
- La réévaluation dynamique;
- La transparence dans les résultats;
- La communication du processus de décisions et des résultats.

Chacun de ces critères sont à prendre en considération lors du choix d'une méthode par rapport à une autre en fonction des contraintes du projet et de nos propres préférences. L'étude démontre qu'il est crucial de choisir une méthode adaptée à nos besoins car les résultats peuvent différer d'une méthode à l'autre.

Enfin Kumar et al. (2017) démontre l'intérêt d'utiliser les méthodes d'analyse multicritère dans le développement des énergies renouvelables dans le contexte d'aujourd'hui. Ils comparent

huit des méthodes les plus utilisées dans la littérature soit : La somme pondérée, le produit pondéré, ELECTRE, TOPSIS, MAUT, PROMETHEE, VIKOR, et enfin AHP.

En comparant les conclusions de ces articles, les méthodes Promethee I&II ont été favorisées car elle répondait aux besoins de l'étude soit : la transparence des résultats, une bonne communication des résultats grâce à l'interface graphique, une facilité d'utilisation grâce au logiciel associé et la possibilité d'utilisation de critère qualitatifs. D'autre part, la facilité d'effectuée une réévaluation des résultats, de réalisé des analyses multicritères et enfin la pondération des scénarios sont des plus.

Afin de confirmer ce choix, les travaux comparant les méthodes de surclassement les plus utilisés ont été analysés. La stabilité des méthodes PROMETHEE I&II est discuté dans une publication de Brans and Vincke (Brans, Vincke et Mareschal, 1986). Les seuils d'indifférence et de préférence sont relativement difficiles à fixer et résultent la plupart du temps du jugement de l'utilisateur. Afin de s'assurer de la stabilité de la méthode malgré cette caractéristique, les auteurs ont réalisé une étude comparative avec la méthode ELECTRE III. Une analyse sur une vingtaine de problèmes types a été effectuée et les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec ELECTRE III. Il apparaît que la méthode PROMETHEE est plus stable que ELECTRE III. Par la suite d'autres analyses plus poussées ont démontré que la taille du problème avait très peu d'influence sur les résultats, en revanche, la difficulté et la proximité des problèmes sont deux facteurs déterminants.

1.3.3 Les méthodes Prométhée

Les méthodes PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation) furent mises au point au début des années 1980 par Jean Pierre Brans et Philippe Vincke donnant suite aux théories de surclassement développées dans les années 1960 par Bernard Roy. Il s'agit d'une famille de méthode ayant pour objectif d'isoler une alternative ou un ensemble d'alternatives répondant au mieux aux objectifs d'un problème selon une liste de

critère. Il ne s'agit pas de pointer une seule et unique solution mais de structurer un problème et d'identifier les conflits et les synergies entre chaque alternative.

PROMETHEE I et II sont deux méthodes complémentaires utilisant un cheminement similaire mais avec des objectifs différents. PROMETHEE I réalise un classement partiel des alternatives et permet d'identifier les incomparabilités et les indifférences entre les alternatives. PROMETHEE II permet d'établir un classement complet.

Considérons un nombre fini n d'alternative $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ et une famille de q critères $F = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$. Le problème est défini par une matrice de décision comme présenté dans le Tableau 1-3 ci-dessous.

Tableau 1-3 : Exemple de matrice de décision

	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	\dots	$f_q(\cdot)$
a_1	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	\dots	$f_q(a_1)$
a_2	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	\dots	$f_q(a_2)$
\dots	\dots	\dots	\dots	
a_n	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	\dots	$f_q(a_n)$

La comparaison des alternatives s'effectue par paire pour chaque critère.

$$d_k(a_i, a_j) = f_k(a_i) - f_k(a_j) \quad (1.1)$$

$d_k(a_i, a_j)$ est la différence entre les évaluations des actions pour le critère f_k . Cette évaluation est ensuite traduite en un indicateur de préférence $P[d_k(a_i, a_j)]$ correspondant à une valeur entre 0 et 1 qui dépend du type de fonction choisi pour le critère k . Tableau 1-4 décrit les différentes fonctions qui peuvent être utilisées. q et p correspondent respectivement aux seuil d'indifférence et de préférence stricte.

Tableau 1-4: Liste de fonctions disponibles pour les méthodes PROMETHEE

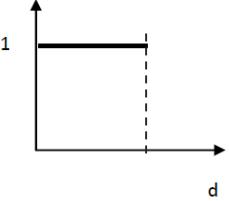
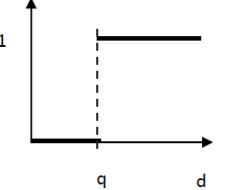
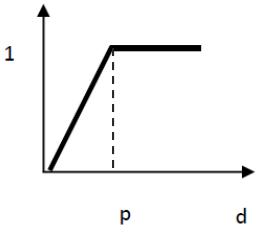
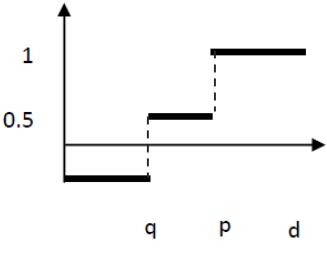
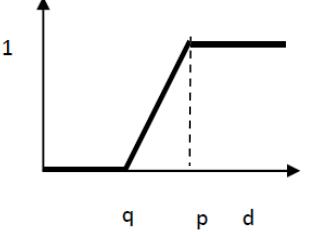
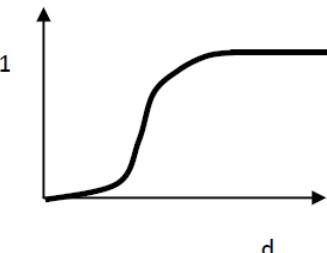
Nom	Visuel	Description
Vrai critère		$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k(a_i, a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{si } d_k(a_i, a_j) > 0 \end{cases}$
Quasi-critère		$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k(a_i, a_j) \leq q \\ 1 & \text{si } d_k(a_i, a_j) > q \end{cases}$
Critère à préférence linéaire		$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k(a_i, a_j) \leq 0 \\ \min\left(\frac{d_k(a_i, a_j)}{p}, 1\right) & \text{si } 0 < d_k(a_i, a_j) \leq p \\ 1 & \text{si } d_k(a_i, a_j) > p \end{cases}$
Critère à paliers		$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k(a_i, a_j) \leq q \\ \frac{1}{2} & \text{si } q < d_k(a_i, a_j) \leq p \\ 1 & \text{si } d_k(a_i, a_j) > p \end{cases}$
Critère préférence linéaire avec zone d'indifférence		$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k(a_i, a_j) \leq q \\ \frac{(d_k(a_i, a_j) - q)}{(p - q)} & \text{si } q < d_k(a_i, a_j) \leq p \\ 1 & \text{si } d_k(a_i, a_j) > p \end{cases}$

Tableau 1-4 (suite)

Critère gaussien		$P[d_k(a_i, a_j)] = 1 - e^{\frac{-d^2}{2\sigma^2}}$ avec σ^2 paramètre analogue à la variance d'une distribution normale
------------------	---	---

Par la suite, l'indicateur de préférence pondéré $\pi(a_i, a_j)$ est calculé en prenant en compte la pondération w_k de chaque critère k . Les flux entrants $\Phi^-(a_i)$ et sortants $\Phi^+(a_i)$ sont également établis.

$$\pi(a_i, a_j) = \frac{\sum_k P_k(a_i, a_j)}{\sum_k w_k} \quad (1.2)$$

$$\Phi^+(a_i) = \sum_{x \in K} \pi(a_i, x) \quad (1.3)$$

$$\Phi^-(a_i) = \sum_{x \in K} \pi(x, a_i) \quad (1.4)$$

Pour le rangement total de la méthode PROMETHEE II, l'incomparabilité est exclue et l'indifférence fortement réduite. Le classement est basé sur les flux net et les deux hypothèses suivantes :

- a_i préféré à a_j si et seulement si $\Phi(a_i) - \Phi(a_j) > 0$
- a_i indifférent à a_j si et seulement si $\Phi(a_i) = \Phi(a_j)$

Le rangement partiel de PROMETHEE I est basé sur les trois hypothèses suivantes :

- a_i préféré à a_j si et seulement si

$$\begin{cases} \Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_j) \text{ and } \Phi^-(a_i) < \Phi^-(a_j) \\ \Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_j) \text{ and } \Phi^-(a_i) = \Phi^-(a_j) \\ \Phi^+(a_i) = \Phi^+(a_j) \text{ and } \Phi^-(a_i) < \Phi^-(a_j) \end{cases}$$
- a_i indifférent à a_j if $\Phi^+(a_i) = \Phi^+(a_j)$ et $\Phi^-(a_i) = \Phi^-(a_j)$
- a_i et a_j sont incomparables si

$$\begin{cases} \Phi^+(a_i) > \Phi^+(a_j) \text{ and } \Phi^-(a_i) > \Phi^-(a_j) \\ \Phi^+(a_i) < \Phi^+(a_j) \text{ and } \Phi^-(a_i) > \Phi^-(a_j) \end{cases}$$

1.3.4 Analyses de sensibilité

L’analyse de sensibilité est une étape indispensable dans le processus de décision, son but est d’évaluer la stabilité et la validité d’une solution identifiée comme répondant au mieux aux objectifs en vertu de changements dans les paramètres. Dans l’aide à la décision multicritères l’évaluation des données joue un rôle crucial. Le tableau de performance, les pondérations de critères, le type et les paramètres des fonctions de préférences sont autant d’éléments fortement liés aux résultats obtenus par l’application d’une méthode multicritère.

Mouine (2011) décrit avec précision les variances dans la définition de l’analyse de sensibilité et arrive à la conclusion que « le thème principal est la variation des variables d’entrée d’un modèle pour étudier leur effet sur les variables de sortie » (Mouine, 2011, p. 21). L’objectif et les résultats attendus d’une analyse de sensibilité doivent être explicités et la méthode suivie choisie avec discernement. Certains auteurs font la distinction entre étude de sensibilité, d’incertitude et de robustesse pour décrire des processus similaires (French, 2003). Ici plusieurs analyses sont effectuées et se réfèrent tous à la terminologie analyse de sensibilité. Les objectifs de chacune de ces analyses est explicitée afin de lever toute ambiguïté.

La première analyse est réalisée sur les fonctions pour s’affranchir de l’influence du choix arbitraire de l’utilisateur. Chacun des seuils est incrémenté pour trouver le seuil optimal. La deuxième analyse se base sur chacune des données d’entrée du tableau de performance dans le but d’évaluer l’intervalle de sensibilité de chacune. La méthode la plus répandue est de faire évoluer la donnée dans son écart-type lorsqu’il existe et d’observer les changements (Mouine, 2011). Devant la difficulté d’obtenir des données dans notre cas, l’inverse est réalisé. L’objectif est d’identifier les valeurs maximum v_{max} et minimum v_{min} qui correspondent à un intervalle sans changement dans le classement final., elles sont incrémentées jusqu’à observation d’un

changement ou jusqu'à une valeur maximum v_{ext} jugée adéquatement. Les résultats obtenus serviront dans la discussion à remettre en perspective les recommandations en répondant aux questions telles que : le classement actuel est valable tant que le coût d'investissement initial de telle solution ne dépasse pas tant, etc.

Les résultats de cette analyse sont discutés dans la discussion et les résultats détaillés sont présents dans l'ANNEXE I.

La troisième analyse est partie intégrante de la problématique, elle porte sur la pondération des critères selon les quatre scénarios étudiés. Le scénario à dominante environnementale, le scénario à dominante sociale, le scénario à dominante économique et enfin le scénario de référence. Faire varier la pondération est essentielle pour évaluer la validité du résultat optimale et permet de simuler un éventuel consensus entre les acteurs qui seraient impliqués dans l'implantation d'un tel projet. Les résultats attendus permettent d'alimenter directement la discussion des recommandations.

Enfin la quatrième analyse pointe sur quelques données spécifiques qui ont été choisies comme hypothèses pour combler les manques lors de la collecte de données.

1.3.5 Logiciel Visual Prométhée

Le logiciel visual PROMETHEE est une interface qui a été développée en collaboration avec les auteurs des méthodes PROMETHEE et GAIA. Il donne suite aux logiciels Decision Lab et PROMCALC qui furent les premiers logiciels à mettre en œuvre les méthodes PROMETHEE, respectivement dans les années 1980 et 1990.

L'interface graphique est particulièrement intéressante car elle permet une réévaluation rapide des résultats en changeant un paramètre ou un critère. La possibilité d'établir différent scénario est idéale pour faire une analyse de sensibilité sur la pondération de chaque critère. Les

graphiques présentant les résultats sont variés et permettent de mettre en avant différentes facettes de l'analyse. Cela offre une interface agréable et facile à appréhender qui peut fournir une base pour une discussion entre les acteurs d'un projet aux compétences différentes (voir ANNEXE II).

Dans l'article le graphique en diamant est sélectionné car on peut y lire à la fois le classement global issus des calculs PROMETHEE I et les flux entrants et sortants de PROMETHEE II. Telle qu'explicité dans la Figure 1-12, il est ainsi aisément de visualiser les préférences strictes d'un scénario sur un autre ou au contraire les conflits qui ne permettent pas de les comparer entre eux.

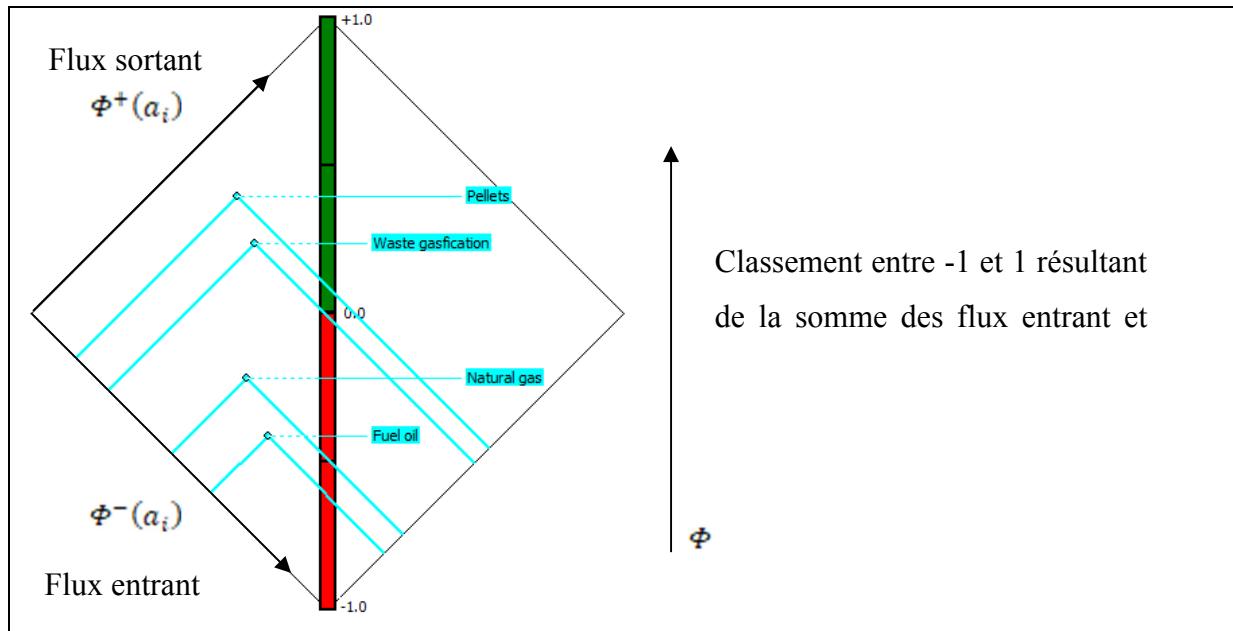


Figure 1-12: Représentation diamant du logiciel Visual PROMETHEE

1.4 Synthèse de la revue de littérature

La présente revue de littérature pose les piliers fondamentaux des travaux qui suivent. Le contexte et les barrières qui en résultent ont été identifiées dans le chapitre 1.1.4. Il faut retenir que la situation actuelle de l'habitat au Nunavik doit être améliorée autant pour le bien être de ces habitants que d'un point de vue écologique et économique. Outre les projets sur la production d'énergie électrique propre et l'efficacité énergétique, la production d'énergie thermique reste un domaine très peu traité. Le Chapitre 1.2 démontre que des solutions existent et sont mises en place dans des contextes similaires. Afin de limiter les impacts sur les habitudes et les coûts d'installation, l'emphase est mise sur le remplacement du combustible utilisé actuellement dans les fournaises. Les trois solutions retenues qui seront comparées à la situation existante sont les granules de bois, le gaz naturel et la gazéification des déchets. Et enfin le chapitre 1.3 présente l'outil qui permettra de comparer ces solutions selon une liste de critère préétablie : les méthodes PROMTHEE I&II. Choisies parmi la grande famille des méthodes d'analyse décisionnelle multi-alternatives celle-ci répond au mieux aux objectifs que s'est fixée l'auteur de ces travaux.

CHAPITRE 2

MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS RANKING ALTERNATIVE HEATING SYSTEMS FOR REMOTE COMMUNITIES IN NUNAVIK

C. Yan^a, D. Rousse^a, Mathias Glaus^b

^a Groupe de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e), École de technologie supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Canada H3C 1K3

^b Experimental Station of Pilot Processes in Environment, École de technologie supérieure, Construction Engineering Department, 1100, Notre-Dame West St., Montreal, Quebec H3C 1K3, Canada

Article soumis pour publication, Décembre 2017

Abstract

The majority of Canada's 300 remote communities must rely on petrol by-products for electricity and heating. However, alternative energy sources are gaining in interest. This paper presents a Multi-Criteria Decision Analysis of four alternative energy systems for heating, that is waste gasification and three types of combustion. A systemic approach is considered based on environmental, social and economic aspects. A single-family house in Kuujjuaq is selected for a case study. Results from the preference ranking organization method for enrichment and evaluation (PROMETHEE) show that wood pellets are the most suitable fuel for heating in all scenarios. It is followed by local waste gasification for the base-case and environmental scenarios and by fuel oil for the social and economic scenarios.

Keywords: MCDA, PROMETHEE, space heating, Nunavik, energy planning.

2.1 Introduction

2.1.1 Context

Canadian remote communities have restricted access to renewable energy projects despite a great potential for it (Thompson et Duggirala, 2009) and in recent years, pilot projects have emerged specifically to produce electricity from wind, solar and biomass energy. For example, Ibrahim et al. (2011) and Rahman et al. (2016) worked on hybrid renewable energy systems and Stephen et al. (2016), Rahman (2014) and Cambero et al. (2015) on biomass heating systems.

In Nunavik, a region located in northern Quebec, 90% of the population is Inuit and special conditions affect project developments as discussed by Krupa in his work on renewable energy in aboriginal communities (Krupa, 2012). Nevertheless, Nunavik strongly wishes to develop renewable energy projects: in February 2017, Nunavik created a jointly owned company to better control the implementation of new renewable energy projects. The objective is to follow Québec's new 2030 Energy Policy aiming to reduce fossil fuel consumption by 40% and improve life conditions for Nunavummiut (MDDELCC, 2015; Duhaime et al., 2015).

In energy planning, the last years have seen a growing awareness of environmental and social issues. Indeed, from a unidirectional point of view, problems have become complex due to the multiplicity of the objectives, alternatives, criteria and stakeholders (Kumar *et al.*, 2017). In order to solve such problems, Multi Criteria Decision Making (MCDM) has proved to be an efficient and popular tool in energy planning (Pohekar et Ramachandran, 2004).

2.1.2 Objectives

This paper proposes a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) of the different alternatives to improve heating in current Nunavik dwellings. Considering the variety of stakeholder's

background and culture, the MCDA's main objective is to offer a tool to open discussion. A typical single-family house located in the city of Kuujjuaq serves as a reference for this analysis.

The objectives of this paper are to: (1) structure and identify all the relevant parameters of the problem, (2) analyse a specific case-study in Kuujjuaq, (3) formulate recommendations to guide stakeholders' decisions and open a discussion.

2.1.3 Content

Four heating alternatives are considered: fuel-oil furnace (actual), pellet furnaces, natural gas furnaces and, finally, waste gasification. Criteria are selected according to environmental considerations, social improvement and economic feasibility. First, results show a ranking of the four alternatives in a balanced configuration, all criteria weights are equal. Then, three different scenarios are analysed to see the influence of weighting on criteria. One scenario supports an environmental perspective, another considers social perspectives and last scenario focusses on economics. This approach opens the discussion on the results according to stakeholders' priority, it identifies common or conflicting objectives prior to the selection process. As a result, the best compromise is pointed out and insights are discussed as recommendations. The solution that globally solves the problem is highlighted, providing the most optimal performance and the least constraints.

2.2 Methods

2.2.1 Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

Based on mathematics and social sciences, MCDM methodologies structure the problem and stresses conflicts and possible synergies between different alternatives (Belton et Stewart, 2002). Pohekar and Ramachandran (2004) made a review of more than 90 papers to analyze

the different variations of the method used in sustainable energy planning and showed that the Analytical Hierarchy Process (AHP), ELECTRE and PROMETHEE methods were the most common types of MCDM.

In this paper, the number of alternatives is finite and the goal is to point out a solution or a group of solutions that would be the best compromise between the objectives, stakeholders' viewpoints and criteria. This is a discrete choice problem and, in this case, outranking methods, focusing on pairwise comparisons, are generally applied. The most common outranking methods are the ELECTRE and PROMETHEE families (Belton et Stewart, 2002).

The Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE) family is a method capable of giving a complete ranking according to a finite set of criteria that may be either quantitative or qualitative. Concordance and discordance indices and thresholds are involved to score a link between two alternatives for each criterion.

The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) is another outranking method created by B. Roy during the 60's and developed further on by Brans Vincke in the 80's (Brans, Vincke et Mareschal, 1986). Difference with the ELECTRE family comes when defining a preference function for each criterion rather than defining indifference and preference thresholds as described in ELECTRE methods. The stability of the PROMETHEE method was discussed by Brans and Vincke to evaluate threshold sensibilities when defining a function (Brans, Vincke et Mareschal, 1986). About twenty problems were modelled and compared to the ELECTRE III method and results show that PROMETHEE is more stable than ELECTRE III.

In this paper, the PROMETHEE method is selected and is used in the Visual PROMETHEE software (Mareschal, 2011).

2.2.2 PROMETHEE methods

Given a finite number of alternatives $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ and a criteria family $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, a pair wise comparison is made for each criterion, where $d_k(a_i, a_j)$ is the difference between the evaluation of the alternative on criterion f_k . Hence,

$$d_k(a_i, a_j) = f_k(a_i) - f_k(a_j) \quad (2.1)$$

The results of each pair comparison are translated in a preference index $P[d_k(a_i, a_j)]$ which lies between 0 and 1 and depends upon the preference function associated to criterion f_k . In this study, three types of preference function are used as follows, with q and p as indifference and preference thresholds:

$$\text{True criterion } P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} 0 & \text{if } d_k(a_i, a_j) = 0 \\ 1 & \text{if } d_k(a_i, a_j) \neq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

V-Shape criterion

$$P[d_k(a_i, a_j)] = \begin{cases} \frac{d_k(a_i, a_j)}{p} & \text{if } -p \leq d_k(a_i, a_j) \leq p \\ 1 & \text{if } d_k(a_i, a_j) < -p \text{ or } d_k(a_i, a_j) > p \end{cases} \quad (2.3)$$

Linear criterion $P[d_k(a_i, a_j)] =$

$$\begin{cases} 0 & \text{if } |d_k(a_i, a_j)| \leq q \\ \frac{(d_k(a_i, a_j) - q)}{(p - q)} & \text{if } q < |d_k(a_i, a_j)| \leq p \\ 1 & \text{if } |d_k(a_i, a_j)| > p \end{cases} \quad (2.4)$$

Then, the multicriteria index $\pi(a_i, a_j)$ is calculated taking into account the weights w_k of each criterion k leading to the leaving and entering flows, $\Phi^+(a_i)$ and $\Phi^-(a_i)$.

$$\pi(a_i, a_j) = \frac{\sum_k P_k(a_i, a_j)}{\sum_k w_k} \quad (2.5)$$

$$\Phi^+(a_i) = \sum_{x \in K} \pi(a_i, x) \quad (2.6)$$

$$\Phi^-(a_i) = \sum_{x \in K} \pi(x, a_i) \quad (2.7)$$

The leaving flow or positive outranking flow $\Phi^+(a_i)$ expresses the extent for a_i to outrank all other options and the entering flow or negative flow $\Phi^-(a_i)$ expresses how much a_i is outranked by all other alternatives.

2.3 Case study

A typical single-family house located in Kuujjuaq is selected as a reference for the analysis. House features are provided by the Société d'Habitation du Québec (SHQ), which together with the Kativik Municipal Housing Bureau (KMHB) is responsible for the dwellings in Nunavik (SHQ, 2012). On the 517 housing units distributed among the 312 buildings managed by the KMHB, 157 are single-family houses. Heated via fuel oil furnace, the annual average consumption of these houses is 3100 L of fuel oil (Fournier, Communication personnelle).

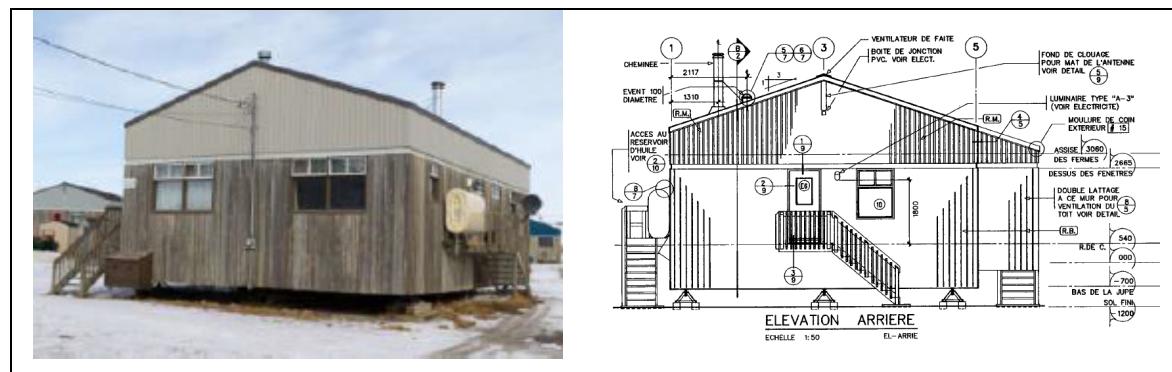


Figure 2-1: A typical single-family three-bedroom household (SHQ, 2012 ; SHQ, 1994)

Figure 2-1 illustrates the typical single-family household that is used for the case study in this paper and Tableau 2-1 presents its relevant characteristics. All variables are relevant to RETscreen.

Tableau 2-1 : Relevant characteristics of the house investigated

Input data	Unit	Value	Reference
Annual fuel consumption M_{AFC}	[L]	3 100	(Fournier, Communication personnelle)
Annual electricity consumption M_{AEC}	[kWh]	8 900	(Fournier, Communication personnelle)
Heating load p_H	[W/m ²]	63.5	(CANMET Energy, 2005)
Theoretical seasonal efficiency $\eta_{hs,se}$	[%]	65	(CANMET Energy, 2005)
Heated floor area A	[m ²]	110.9	(SHQ, 1994)
Fuel oil lower heating value (LHV) C_f	[kWh/L]	10.74	(CANMET Energy, 2005)

Heat is distributed via an air-based central heating system. Costs associated to the distribution system (ducting) are excluded from the study. It is assumed that the original air distribution system is used as such. Using the information from KMHB, a typical consumption profile was constructed in Figure 2-2. KMHB provided the fuel oil consumption distribution in percentage for each month ρ_{month} , and the energy delivered to the house is calculated according to equation (1) and presented in Figure 2-2. Electricity consumption is stable throughout the year (Fournier, Communication personnelle).

$$M_{MFC} = \rho_{month} \times \eta \times M_{AFC} \quad (2.8)$$

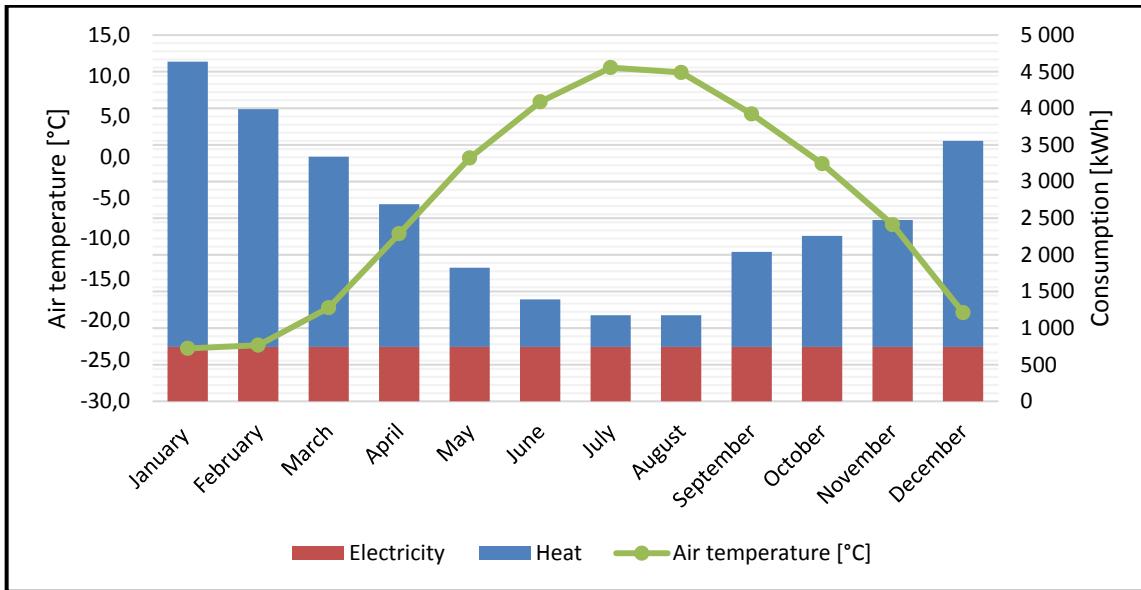


Figure 2-2: Proposed case-study monthly consumption profile (CANMET Energy, 2005 ; Fournier, Communication personnelle). Heating represents most of the global consumption and that its level of consumption depends directly on the temperature outdoors

From this data, a RETScreen analysis was carried out to determine the heating system load and energy requirements. Tableau 2-2 presents the RETscreen climate data used for the analysis

Tableau 2-2: Geographic data on Kuujjuaq
(CANMET Energy, 2005)

Climate data	Unit	Value
Latitude	[°N]	58.1
Longitude	[°E]	-68.42
Elevation	[m]	39
Heating design temperature	[°C]	-35

In RETScreen, the peak heating load for a building is a value P expressed in Watts and is expressed according to the floor area. It depends on p_H , the building heating load, which depends upon heating design temperature and building insulation efficiency (CANMET Energy, 2005, p. 30). The total peak load P is therefore:

$$P = p_H \times A = 7.0 \text{ kW}. \quad (2.9)$$

The heating energy demands of building Q_{AH} is calculated by taking into account the annual fuel consumption M_{AFC} , the heating system seasonal efficiency $\eta_{hs,se}$ and the calorific value for the fuel type C_f (CANMET Energy, 2005, p. 32), such that:

$$Q_{AH} = M_{AFC} \times \eta_{hs,se} \times C_f = 21\,641 \text{ kWh} \quad (2.10)$$

The actual peak heating load is then 7 kW and the heating energy demand is 21.6 MWh.

2.4 Different alternatives

A global study was first performed to disqualify some alternatives such as hydroelectric dams, small hydro, solar, wind and tidal powers and geothermic technology that are not applicable due to the Nordic climate, limitations to electricity production and actual economic issues (Lefevre, 2016 ; Majorowicz et Minea, 2015). Climate conditions such as constant humidity and discontinuous permafrost (Grandmont, Fortier et Cardille, 2012) have to be considered in order to choose a resilient solution. Despite these difficulties, Yellowknife and Behchoko both located above the 62nd parallel in the Northern Territories of Canada are operating wood pellets district heating (Arctic Energy Alliance, 2013; Boute, 2016).

Four options are consequently considered herein: pellet furnaces, natural gas furnaces, waste gasification systems and business-as-usual for comparison.

2.4.1 Wood pellets

With its wood resources, Canada has a great potential that has yet to be exploited (Madrali, 2016). Some projects have been undertaken throughout the country and show great

advantages in terms of employment, savings and impacts on the environment (Vision Biomasse Québec, 2015). Biomass residential heating includes a wide variety of solutions in both type of technology and combustible; the appropriate solution depends on purpose, scope and location of a specific project.

In this study, there is strictly no possibility of relying upon a local biomass supply, because the vegetation suitable for pellet production is absent. The official report on the Northern limits of “attributable” forests fixes the Northern border at 53° N (Jobidon et Bergeron, 2013). Therefore, whatever its final form, biomass must be imported from other parts of Canada. Compared to logs and chips, pellets have higher calorific value, lower and homogeneous humidity and a higher density. Moreover, Canada is a great producer and exporter of pellets thanks to residues from the forest industry (Arsenault, 2016).

2.4.2 Natural gas

Canada is the 5th producer and 4th exporter of natural gas in the world (RNCan, 2011). Natural gas produces less GHG emissions during combustion than fuel oil (51 g/MJ and 78 g/MJ respectively) and no particle emissions (Solomatnikova, 2011). Mostly composed of methane, it can be reduced by about 600 times when liquefied (Reiss, 2006). To implement the use of natural gas in the remote location of Kuujjuaq, the main challenge is receiving and storage. LNG needs to be brought from one liquified terminal to another and such infrastructures are costly and require highly qualified labour. However, average prices over the last 10 years show that natural gas is more than 4 times cheaper than domestic fuel oil (RNCan, 2011) so the solution is interesting to consider and might be viable for large volumes. Recommended as an alternative to oil and coal, natural gas plays a preponderant role in Quebec’s GHG reduction objectives (MDDELCC, 2015) despite its inherent impacts (Suzuki et Hanington, 2011).

2.4.3 Waste

In 2013, Kativik's Regional Government wrote a statement with recommendations to take action on waste management (Barrett et Gagné, 2013). At the end 2017, Canada has 11 projects are in operation and 12 are in development (BiogasWorld, 2017). Waste valorisation technologies can be classified into two families: transformation by biological or heat conversion. Biological conversion treats exclusively organic material and follows a complex set of processes by which microorganisms break down biodegradable material in an anaerobic environment leading to an energy-rich biogas composed of 55 to 75% of methane (Curry et Pillay, 2014). Because of the total absence of sorting in 2017 this solution is put aside in this paper.

Between combustion and pyrolysis, gasification consists of a partial oxidation of the combustible material using a quantity of oxidant inferior to that needed during a stoichiometry combustion (Arena, 2012). Solid waste is then transformed into a synthesis gas (CO , H_2 , CH_4). Combined with waste management to reduce costs, gasification becomes an attractive solution for energy production and waste treatment (Arena, 2012).

The technology's apparent complexity and lack of maturity delayed the deployment of such solutions, but some technologies are now robust enough to be implemented in remote sites. Waste sorting is planned which would facilitate implementation of a gasification project. As mentioned by T. M. Weis et al. (2008) in his work on stakeholders' perspectives on barriers to remote a wind-diesel power plant in Canada, more than actual risk, the perception of risk by the stakeholders can be a very strong obstacle.

2.5 Criteria matrix

Criteria family selection is one of the most crucial steps in MCDA. It must encompass all aspects of the problem and be able to highlight differences between alternatives. In short,

the list has to be exhaustive, cohesive and non-redundant (Belton et Stewart, 2002). Twelve sub-criteria have been established and are discussed in the following sections; for each of them, calculations and parameters are described in detail. Paragraph 2.5.4 summarizes the values for each sub-criterion involved in the study. In order to make these calculations, each alternative has been sized according to the case study.

2.5.1 Environmental criteria

Alternatives are compared on the most relevant step of their life. Figure 2-3 details the common steps of fuel production taken into account. Scientific papers covering the impact of processing stages for each fuel are numerous, but results differ according to the initial hypothesis taken by the author (Burnham et al., 2012 ; Labbé, 2014 ; Stefan, 2004). As a result, a single paper is selected to compare processing stages and transport. The indicator chosen is carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2 \text{ eq.}$), which measures the global warming potential of GHG released. Then, the study covers the different gaseous flows and associated emitted species, sulphur dioxide (SO_2), nitrogen oxide (NO_x), carbon monoxide (CO) and particulate matter (PM).

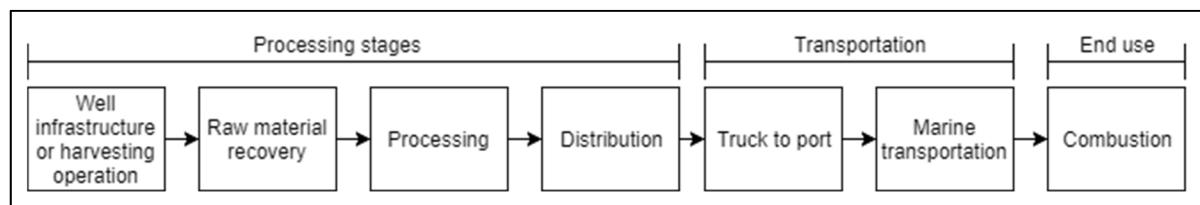


Figure 2-3: Common steps compared for each of the alternatives

Equipment and installations are not considered in the environmental impact assessments. It is assumed that from one solution to another they have similar impacts. Emphasis was focussed on the various combustibles (also referred to as fuels), identified as different resources.

2.5.1.1 Fuel environmental assessment

Data are based on a study from Pa et al. (2012), which compares wood pellets as fuel with conventional solutions such as coal, heavy fuel oil (HFO), diesel, and natural gas (Pa et al., 2012). Their analysis uses the life-cycle impact assessment methodology IMPACT 2002+, which treats several damage categories. It reports impacts up to distribution locations, therefore supply route scenarios are considered to calculate extra emissions due to Kuujjuaq's remote location. GHG emissions due to transportation is the amount of CO₂ eq. emitted per metric ton per km of transportation. Distances from Tableau 2-3 are multiplied by emissions factors; 75.33 gCO₂.eq/T.km for road transportation vs 14.02 gCO₂.eq/T.km for sea transportation (EEA, 2011). Due to transportation by truck, pellets supply has a stronger impact on the environment.

Tableau 2-3: Fuel supply routes

Fuel	Route	Weight per house per year [T]	Distance by truck [km]	Distance by sea [km]	Emissions [gCO ₂ eq./GJ]
Heating oil Pellets	Montreal - Kuujjuaq	2.61	3 500	0	1 643
	Saguenay - Kuujjuaq	5.44	2 700	3000	4 573
Natural gas	Massachusetts	3.03	4 000	0	2 180

Gasification has zero emissions because the waste management logistic is an external activity.

2.5.1.2 Emissions during combustion

NOx is a generic term for nitrogen oxides such as NO and NO₂, together with SO₂. These gases lead to regional soil acidification and eutrophication, and localized lung irritation. CO and PM require attention at a local scale, because they lead to health issues. Values are extracted from a report on bioenergy technologies developed by the Industrial Research Center of Quebec (CRIQ) (Solomatnikova, 2011).

Tableau 2-4: Emissions data related to combustion of fuel oil, natural gas, wood pellets and waste residuals (Solomatnikova, 2011, p. 58)

Fuel	Productivity [%]	SO ₂	NOx [mg/MJ]	CO	PM
Fuel oil	75	220	55	50	5
Natural gas	75	0.25	40	50	0.8
Wood pellets	75	10	45	16	4
Waste	-	2	88	24	0.1

2.5.1.3 Spillage damage impact

Spillage accidents are rare, yet they do occur. For instance, a spill of 13 500 L of diesel from Inukjuak's thermal power station occurred in 2015 (Hydro-Québec, 2015). The impact is very different from one solution to another, but hardly quantified as such. Therefore, a 5-point qualitative scale is used, from very low impact to very high impact. Accidents involving petrol by-products are hard to predict and control and are harmful for the local fauna, flora and population (Dave et Ghaly, 2011). If something occurs while transporting LNG, effects are different on the marine environment, because of the properties of the gas itself. Natural gas at atmospheric conditions is lighter than air: it scatters and lifts quickly. In the case of LNG spilled into water, again its density at liquid state is lighter than that of water so it stays at the surface and eventually evaporates (Reiss, 2006). As mentioned in (Gaspar et al., 2014), these statements require further assessment and a better understanding of possible harmful consequences. Regarding wood pellets, the impact is negligible, because the biomass is biodegradable by definition. Results are directly reported in Tableau 2-8.

2.5.2 Social criteria

The social criterion is divided into three sub-criteria, which reflects social acceptability to consider the balance between the involvement of community members and the level of effort

to be made. Such aspects cannot be quantified and therefore a qualitative scale is used. This scale measures a level of impact from very low to very high in five points. An intermediate step is added where each sub criterion is evaluated in terms of minus and plus signs. The more minus signs, the bigger the impact. Each column is summed and the sum corresponds to a level of impact. Values for these criteria are based on the authors' judgement, discussion with experts and feedback from Northern projects.

2.5.2.1 Operation complexity

This criterion intends to measure the intricacies involved in the implementation of a technology in Kuujjuaq. Equipment complexity, technology maturity and expertise availability are considered and assessed in Tableau 2-5. These reflect the need of highly qualified personnel, which can be difficult to recruit and retain in Northern Quebec. Natural gas infrastructures are complex due to LNG properties and need high expertise to be managed properly. On the other hand, fuel oil is the easiest solution to implement, because it has been on site for decades. Gasification is a simple technology, but very new; lack of feedback increases risks.

Tableau 2-5: Operation complexity assessment

	Fuel oil	Pellets	Natural gas	Gasification
Complexity for the user	---	-	+++	-
Technology immaturity	---	--	--	+++
Training needs	---	--	+++	--
Overall complexity	Very low	Low	High	Moderate

2.5.2.2 Change of habits

Acceptability to the user and the resident's comfort is considered here, change of habits is meant to take into account effects on the community's daily life at all levels. It evaluates

acceptability to users, local logistics, storage and transportation as shown in Tableau 2-6. Fuel oil has a very low impact, because there is no change of habits involved. Natural gas again has a high impact. Because of the nature of LNG, special means must be deployed in order to use it with utmost safety. Gasification ‘change-of-habit’ has a direct impact on the user with the necessary selecting/sorting that have proven to be difficult to implement.

Tableau 2-6: Change of habits assessment

	Fuel oil	Pellets	Natural gas	Gasification
User	---	--	-	+++
Local logistic	---	-	+++	++
Storage	---	+	+++	--
Supply	---	--	+++	+
Overall change of habits	Very low	Low	Very high	High

2.5.2.3 Direct and indirect fallouts

Fallouts is a global index for the community and the region. In this context, it takes into account fossil fuel dependency, potential side-product valorisation, and job creation. Pellets combustion generates a certain amount of ashes, and these have fertilizing properties. This could be a major plus for local farming (i.e. necessarily in greenhouses), helping in crop growth and generating an income. Waste gasification has a significant impact on waste management because it must be part of a largescale project in order fully reorganize and integrate waste logistics. Savings could be generated when transportation and storage spaces are reduced. Tableau 2-7 summarizes each consideration into one assessment for each alternative.

Tableau 2-7: Direct and indirect fallouts assessment

	Fuel oil	Pellets	Natural gas	Gasification
Use of non-renewable resource	---	+++	-	+++
Side-product valorisation	---	+	--	+++
Job creation	+	++	+++	++
Assessment	Low	High	Moderate	Very high

2.5.3 Economics criteria

Costs are computed for the household presented in the case-study. Some equipment, especially for storage, cannot be designed for a single house so costs are first calculated per GJ and then recalculated to represent a single house's consumption.

2.5.3.1 Net present costs

The cost of a fuel oil furnace is approximately \$4 000 including transportation and installation (Fournier, 2017). No other cost is included; installations are well integrated in the community's organisation. The community greatly favors fuel oil furnaces, because no extra infrastructure costs are included in the study leading to a fairly low net present cost. This will be explained in further details in the discussion.

The cost of a wood pellets furnace is based on the average market prices and a factor of 1.4 is applied to consider transportation and installation (Stephen et al., 2016). Pellets are stored in a warehouse that protects them from humidity in order to preserve their quality. According to an experienced Nordic architect (Moutquin, Personal communication), construction work for such a structure costs about \$6 000/m² and that represents about \$1.2 million for a 200m² building with a storage capacity of 50 m³ of pellets. This capacity could feed about 60 households having identical heating demands (8.35m³ of pellets) as that of the case-study dwelling.

$$\begin{aligned}
 NPC_{pellets} &= \text{Pellet furnace cost} \times 1.4 & (2.11) \\
 &+ \text{Warehouse} \frac{\text{cost}}{\text{Warehouse capacity}} = \$38\,940
 \end{aligned}$$

The cost of a natural gas furnace is calculated based on average market prices as well (Canadian furnace prices, 2017) and the same 1.4 factor is applied. When it is transported in LNG form, storage and regasification equipment are needed. An analysis for a production of 666 000 GJ/year was performed and the final cost is estimated at \$1 032 per house (Constantineau, Unpublished results). To supply natural gas to the furnace, a network of pipes must be designed and a detailed analysis must be performed to select the best material within the complex parameters. To take this into account, \$100 000 is allotted as an extra cost of construction work and this is added per house to the net present cost. This value is chosen arbitrarily, but the author based the value on a discussion with an expert on the subject and the value will be subject to a sensitivity analysis.

$$\begin{aligned}
 NPC_{NG} &= \text{Natural gas furnace cost} \times 1.4 + \text{infrastructure cost} & (2.12) \\
 &+ \text{construction work cost} = \$105\,071
 \end{aligned}$$

The cost data for gasification systems were obtained from a single supplier, because such technologies are not yet well developed and few technologies are developed and tested at a small scale such as the one considered here (Terragon, Unpublished results). A sensitivity analysis to estimate a viable range of costs for this alternative is performed later. Installation and transport is taken into account in the gasification system cost. The system is meant to be directly on site, to reduce waste logistics and has an output of 943MWh/year. It could supply 43 houses or a bigger installation such as a swimming pool, an arena or an institutional building. It is assumed that the system provides energy to several houses. It requires a pipe network to bring syngas to the house furnaces, a value of \$100 000 extra cost of construction work is considered. The amount of this value is based on estimations made for natural gas alternatives and will be subject to a sensitivity analysis.

$$\begin{aligned}
 NPC_{waste} &= \text{Gasification system cost} + \text{construction work cost} \\
 &= \$109\,971
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

2.5.3.2 Variables cost of operation and maintenance (O&M)

In June 2017, 1L of fuel oil cost \$1.60 including transportation and local logistics. Maintenance needs are 4 hours per year (Fournier, 2017). An average \$26/h hourly rate is considered for all furnace maintenance (Neuvoo, 2017).

$$\begin{aligned}
 OMC_{oil} &= O\&M \text{ duration} \times \text{hourly cost} + \text{fuel consumption} \times \text{fuel cost} \\
 &= \$5\,064
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Pellet transportation is calculated from St. Félicien to Kuujjuaq at a cost of \$399 per 2.5m³ (NEAS, 2017). A classic 500lb hopper is considered for the case-study house, which corresponds to two weeks autonomy. A fully automated pellet furnace has little need for maintenance, some 4 hours annually is considered (Fournier, Communication personnelle).

$$\begin{aligned}
 OMC_{pellets} &= O\&M \text{ duration} \times \text{hourly cost} + \text{fuel consumption} \\
 &\quad \times \text{fuel cost delivery frequency} \times \text{delivery cost} \\
 &\quad + \text{pellets volume} \times \text{transportation cost per volume} \\
 &= \$2\,895
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Maintenance and operation for regasification and storage structure charge \$1.21/GJ (Constantineau, Unpublished results). A natural gas furnace itself is competitive and needs about 2 hours of maintenance per year. Transportation of natural gas is the biggest issue for this alternative. No technology today is mature enough to unload LNG from carrier to land due to its cryogenic properties. Therefore, a cryo-container is the only available solution, but it is limited to the regulated 15T capacity of unloading facilities in Kuujjuaq. A full 20" LNG container weighs 35 tonnes so it cannot be loaded at its maximum capacity in Kuujjuaq. The

cost of this type of container with LNG loaded is approximatively \$90 000 leading to an energy cost of \$253.73/GJ (Constantineau, Unpublished results),(CME Group, 2017).

$$\begin{aligned}
 OMC_{NG} &= O\&M \text{ duration} \times \text{hourly cost} + \text{structure O\&M cost} \\
 &\quad \times \text{heating consumption} + \text{transport and gas cost} \\
 &\quad \times \text{heating consumption} = \$19\,899
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Regarding the gasification system, operating costs are up to \$58/GJ due to electricity consumption, diesel fuel needed for the starter, maintenance and on-site presence to load the waste (Terragon, 2017).

$$OMC_{NG} = \text{structure O\&M cost} \times \text{heating consumption} = \$4\,530 \tag{2.17}$$

2.5.3.3 Life-cycle cost

The life-cycle cost is calculated over a 20-year period. Initial investments are paid within 15 years. Heating oil, pellets, natural gas furnaces and gasification systems respectively have a 12, 25, 12 and 15-year lifespan.

2.5.4 Input data

Tableau 2-8 summarizes data for each criterion as used in this study.

Tableau 2-8: List of inputs

Sub criteria	Units	Fuel oil	Pellets	Natural gas	Gasification
Fuel environmental assessment	[gCO ₂ eq/GJ]	89 078	12 473	58 780	0
SO ₂ eq. emissions	[mg/MJ]	220	10	0.25	2
NOx emissions	[mg/MJ]	55	45	40	88.1

Sub criteria	Units	Fuel oil	Pellets	Natural gas	Gasification
CO emissions	[mg/MJ]	50	16	50	23.6
PM emissions	[mg/MJ]	5	4	0.8	0
Spillage damage impact	[impact]	Very high	Very low	Moderate	Very low
Operation complexity	[impact]	Very low	Low	High	Moderate
Change of habits	[impact]	Very low	Low	Very high	High
Direct and indirect fallouts	[impact]	Low	High	Moderate	Very high
Net present cost	[\\$]	4 000	38 940	105 071	109 971
Variable cost of O&M ¹	[\$/an]	5 061	2 895	19 899	4 530
Life-cycle cost	[\$/GJ]	75.6	59.8	325.5	135.1

¹ Operation and maintenance

2.5.5 Assumptions

Weights have a strong influence on the results and are often debatable. As mentioned in the introduction, scenarios are chosen in order to discuss this sensitivity, by building different outcomes of discussion between stakeholders. Total weighting is 100%, sub criteria are distributed between the three sets of criteria, namely environmental, social and economic. For each scenario, a 75% of weighting is attribute to the emphasized criterion.

In multi-criteria analysis, there are usually multiple objectives. In Visual PROMETHEE these are modelled by the function's minimum and maximum. In this paper, most of the criteria are defined as undesirable impacts, so they should be minimized with the exception of the fallouts which we want to maximize. Preference functions and threshold values are chosen according to the literature and the authors' judgement and experience.

Tableau 2-9 presents parameter details as modelled in Visual PROMETHEE. Functions were introduced in section 2.2.2 and threshold q and p define function parameters, respectively the indifference and preference thresholds. This shows PROMETHEE analysis method's capacity to deal with different kinds of criteria (quantitative or qualitative), at different levels of exactitude (functions and thresholds) and to treat different scenarios with great ease.

Tableau 2-9: List of criteria and associated properties

Sub-criteria Scenarios	Base case	Weights			Type	Min/ max	Function	q	p
		Env.	Social	Econ.					
Fuel environmental impact	5.56	12.50	2.08	2.08	Quantitative	min	Linear	1 000	15 000
SO ₂ eq. emissions	5.56	12.50	2.08	2.08	Quantitative	min	Linear	5	50
NOx emissions	5.56	12.50	2.08	2.08	Quantitative	min	Linear	5	50
CO emissions	5.56	12.50	2.08	2.08	Quantitative	min	Linear	1	5
PM emissions	5.56	12.50	2.08	2.08	Quantitative	min	Linear	1	5
Spill damage impact	5.56	12.50	2.08	2.08	Qualitative	min	Usual	n/a	n/a
Operation complexity	11.11	4.17	25.00	4.17	Qualitative	min	Usual	n/a	n/a
Change of habits	11.11	4.17	25.00	4.17	Qualitative	min	Usual	n/a	n/a
Direct and indirect fallouts	11.11	4.17	25.00	4.17	Qualitative	max	Usual	n/a	n/a
Net present cost	11.11	4.17	4.17	25.00	Quantitative	min	Linear	1 000	10 000
Variable cost of O&M ¹	11.11	4.17	4.17	25.00	Quantitative	min	Linear	1 000	5 000
Life-cycle cost	11.11	4.17	4.17	25.00	Quantitative	min	Usual	n/a	n/a
Total	100	100	100						

¹ Operation and maintenance

2.6 Results and discussion

2.6.1 Results

Tableau 2-10 shows the net, leaving and entering flows and PROMETHEE complete ranking. It appears that pellets results encompass all alternatives in each scenario therefore it is the favored solution. It has costs advantages, moderate impact on the community and rather low emissions due to extraction or combustion.

Tableau 2-10: Net, entering and leaving flows and complete ranking PROMETHEE

	Ranking	Net flow Φ	Leaving flow		Entering flow Φ^-
			Φ^+	Φ^-	
Base case scenario					

Fuel oil	3	0.06	0.46	0.40
Pellets	1	0.43	0.62	0.19
Natural gas	4	-0.55	0.15	0.70
Waste gasification	2	0.06	0.44	0.37
Environmental scenario				
Fuel oil	4	-0.41	0.19	0.61
Pellets	1	0.39	0.54	0.15
Natural gas	3	-0.22	0.25	0.47
Waste gasification	2	0.24	0.50	0.26
Social scenario				
Fuel oil	2	0.23	0.59	0.35
Pellets	1	0.37	0.65	0.27
Natural gas	4	-0.69	0.13	0.82
Waste gasification	3	0.09	0.50	0.42
Economic scenario				
Fuel oil	2	0.35	0.59	0.24
Pellets	1	0.53	0.67	0.14
Natural gas	4	-0.74	0.08	0.82
Waste gasification	3	-0.14	0.30	0.44

Figure 2-4 to Figure 2-7 present the results. Diamond display shows the complete ranking on the vertical axis and leaving and entering flows on the edge of the diamond. The square corresponds to the (Φ^+, Φ^-) plane where each alternative is represented by a point. The plane is angled 45° so that the vertical dimension gives the Φ . For one alternative to be strictly better than the other, it has to encompass all flows.

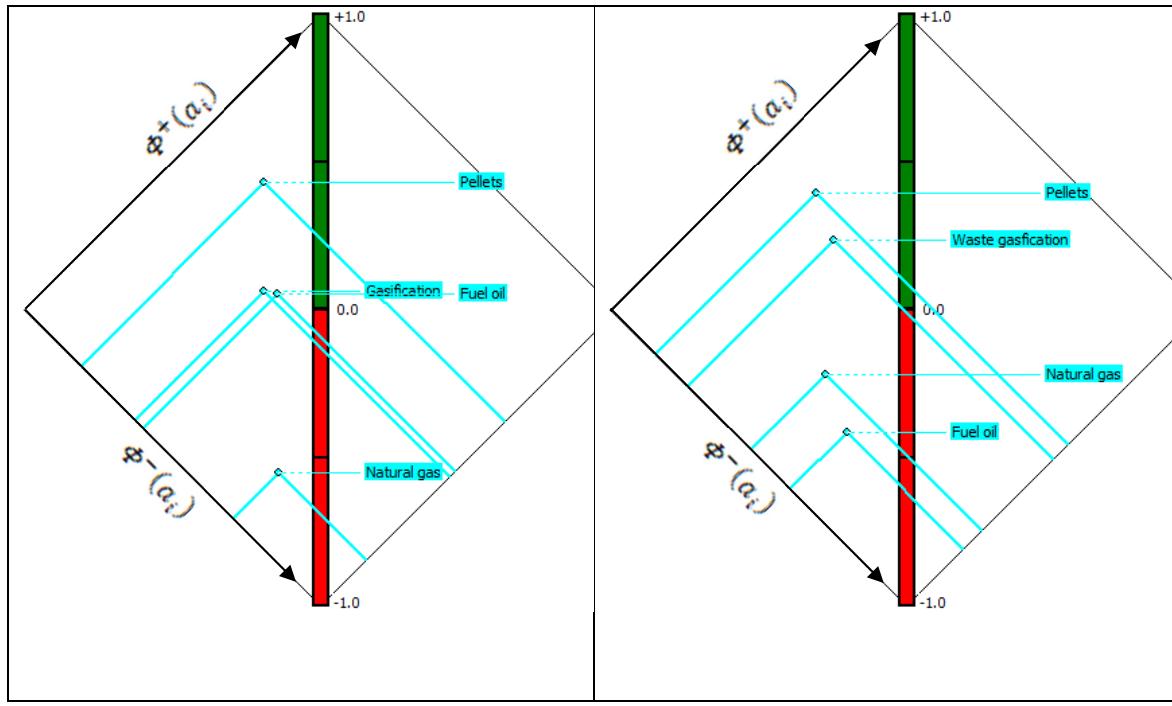


Figure 2-4: Base case scenario - Diamond display

Figure 2-5: Environmental scenario - Diamond display

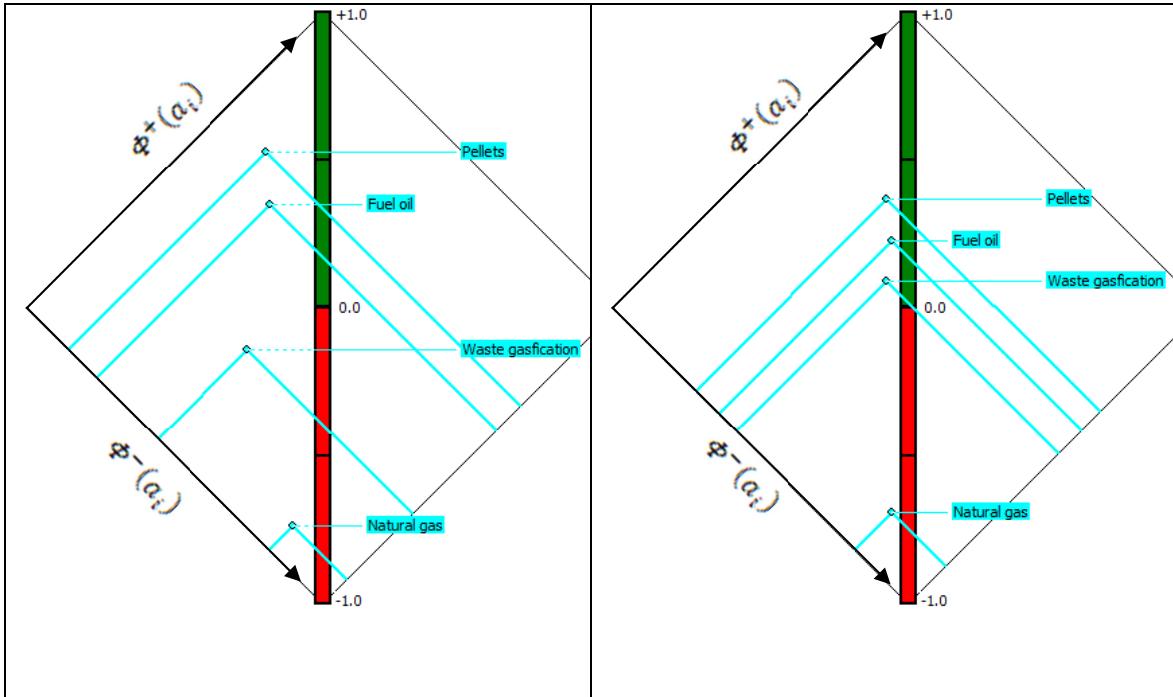


Figure 2-6: Social scenario - Diamond display

Figure 2-7: Economics scenario - Diamond display

In the base-case scenario, waste gasification and fuel oil are respectively second and third and natural gas is far behind in last position. It appears that second and third position have a similar score in the complete ranking and appear to be not comparable in the diamond display. Neither of them encompasses the other, their results counterbalance. All but one environmental criteria indicate that fuel oil has the worst impacts and all but one social criteria favour fuel oil over the others. In both cases, waste gasification has the opposite results. Except for SO₂ and NOx emissions, no criterion favors natural gas.

In the environmental scenario, natural gas is favored over fuel oil thanks to its low emissions in SO₂ and NOx during combustion. In the social scenario, fuel oil is supported by the social criteria due to its currently high level of integration; there is no change of habits nor operation complexity. Waste gasification is third due to the impact on waste management, which implies a large commitment from the community. Finally, natural gas is fourth because of the complexity of regasification and storage installations. In the economic scenario, pellets and fuel oil are relatively close to each other in first and second place. This highlights the

fact that pellets are more optimal in an absolute economical point of view, nevertheless the savings are not significant. This fact might interfere when emphasis is placed on economics.

2.6.2 Discussions and recommandations

The sensitivity analysis made through the scenarios does not highlight any sensitive value in the model. This accentuates the reliability of the model and trust in the results. It must be kept in mind that the objective of a MCDA is not to point out a single ideal solution, but rather to structure the problem and identify conflicts and synergies between different alternatives.

Wood pellets is first in the rankings for each scenario and arises as the most suitable solution apart from the stakeholders' judgements. This result is supported by different analyses about heating system options. Ghafghazi et al., Kontu et al. and Stephen et al.'s results all indicate that biomass is the most suitable solution in their specific studies (Ghafghazi et al., 2010 ; Kontu et al., 2015 ; Stephen et al., 2016). Emphasis is made on the supply; results are strongly influenced by the origin of the pellets. Best results are obtained when the production of wood pellets is local, that is, from forest residues as close as possible to the end-users. Economic and environmental negative impacts are minimal when transport is reduced and when forest wastes are recycled. Social benefits are maximal when local jobs are created. The present work is slightly different, because pellets are imported on a nation-wide scale and benefits are shared with the regions of Quebec that produce the renewable fuel.

Natural gas results are the worst mainly because of transportation and storage values. Nowadays, Nunavik infrastructures are far from suitable for this type of combustible, because of its cryogenic nature. In the present analysis, the cryogenic container is loaded only up to 26% of its capacity, because of the 15 tonne-limit for a container being delivered to Kuujjuaq. Two scenarios could be considered if there is further technological development. In the first scenario, Kuujjuaq authorities upgrade their port infrastructure to

be able to receive a 36T container (maximum capacity of 20" cryogenic containers). The second scenario involves unloading the delivering ship to a storage tank through a buoyant cryogenic pipe connected to the gasification station onshore. Although quite hypothetical, these alternatives show that there is much room for improvement in natural gas for Nunavik. Efforts made towards implementation of this solution would be efficient only in the context of a global natural gas approach, including electricity production and high-volume deliveries, knowing that dependency on non-renewable energy and price fluctuations will remain issues.

Gasification would be recommended where waste treatment is also a high-level problematic situation. High cost and apparent complexity would be compensated for by savings made on waste collection, waste treatment and the negative side effects of bad waste management (i.e. pollution). Even if optimal waste collection logistics were achieved, gasification for energy production is limited by the amount of available waste. In Kuujjuaq, each year 1.01T of waste is produced per capita (Dessureault, Grégoire et Côté, 2014), 62% of this amount is compatible with gasification systems which leads to about 1 616T of waste available in the whole of Kuujjuaq per year. If used 24h/24h for residential heating, it would feed four MAGS gasifiers, which would supply only 189 households (Terragon, Unpublished results). Hence, gasification cannot in and of itself solve the problem of energy demands.

A more detailed environmental and social impacts study would be required to take into account each and every consequence of the final solution to be implemented. As mentioned in section 2.5.1, the environmental criteria selected herein is not exhaustive. Other impacts on the environment such as ecosystem quality, amount of non-renewable energy used, primary energy used and human health are not selected, because of a lack of reliable data.

In addition, the supply routes considered in the base-case scenario were chosen as the most appropriate routes for each solution from capacities and geographic points of view. However, these routes can change due to supply availability or other logistic and/or economic reasons. This factor can influence logistic costs as well as environmental impact.

As seen in section 1, truck transportation has a strong influence on GHG emission so the origin of the production pellets site must be chosen carefully.

Finally, this paper does not deal with the importance of subsidies, grants, tax credits and current or required policies which would be essential in this type of project. As mentioned in the context, one of the barriers that prevents remote communities from developing ambitious projects is capital (Krupa, 2012). Without suitable financial support, it is unlikely that such a project can be initiated.

2.7 Conclusion

Nowadays, most isolated Northern communities solely rely on fuel oil to ensure heating all year long. This situation involves high operating costs, total dependence on foreign resources, low efficiency, high environmental risks and net carbon dioxide emissions.

Hence, a multi criteria analysis was performed to compare four heating options for an average single-family house located in Kuujjuaq, Nunavik, Canada.

Results show that heating with wood pellets is the most suitable alternative for all scenarios. Waste gasification is second in the base-case and the environmental scenario, and third in the social and economic scenario. Social acceptance is low, because of the impact on waste management logistics, but benefits are produced in jobs creation, waste treatment, and air quality. Furthermore, it is the only option considered that does not require fuel importation from another part of North America. Waste gasification is a local solution as well, but waste quantities are not sufficient to heat the entire village. Natural gas is fourth in all scenarios except the environmental scenario because of its high costs and complex infrastructure. This solution would be advantageous only if large volumes of natural gas were imported and uses were diversified (i.e. electricity production, industrial activity). Finally, fuel oil is last for the

environmental scenario but second for the social and economic scenarios, because it is the current solution.

In the study, results were found to be independent of the parameters varied in the sensitivity analysis: wood pellet-based systems remain first whichever scenario is considered. Among all criteria, this reveals that logistic has a preponderant impact of the choice of a solution while technical issues can be overcome.

As a final remark, it should be reminded that the study focusses on existing houses only. However, there is a severe housing crisis in Northern communities and new dwellings have to be built soon. This study could provide an opportunity to improve the current design of houses, which dates back to the 1990's. And in the design process, one should also remind that energy efficiency, including heat production, could be second to social acceptation to ensure success.

2.8 Acknowledgments

The authors would like to thank the national science and engineering council of Canada (NSERC), the Fonds Québécois de la Recherche (FRQ), and to acknowledge the generous donation from Mr. Michel Trottier.

CHAPITRE 3

SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

La discussion de l'article est certainement la partie la plus importante à retenir car elle offre une mise en perspective nécessaire à une analyse multicritère. Les aspects les plus importants sont évoqués et discutés par rapport aux éléments extérieurs qui n'ont pas été compilé dans l'analyse. L'objectif de cette troisième partie est de synthétiser la réflexion et d'apporter une vision complémentaire à cette mise en perspective.

3.1.1 La réalité Nordique

Un aspect important à pointer du doigt est le côté théorique de ces travaux qui, dans le cas d'étude sur une région nordique, prend une dimension toute autre. Les différences de résultats entre théorie et pratique sont évidents et il existe de nombreuses méthodes pour palier à celles-ci, telle que l'expérimentation terrain et l'implication des acteurs voués à travailler sur un tel projet. Dans la présente étude la partie terrain n'a pas pu être effectuée par manque de moyen et de contact. En effet, il a été particulièrement difficile d'obtenir des données actuelles sur la situation du Nunavik et l'éloignement a rendu impossible les voyages sur place.

De plus, il faut prendre en compte la différence de perception Nord/Sud résultant de la différence fondamentale entre les deux cultures. À titre d'exemple, la notion même de « terre » a une définition bien distincte entre les allochtones et les autochtones. Pour les premiers, la terre est un bien qui peut faire l'objet d'une transaction (achat, vente, etc) alors que chez les autochtones la terre est un élément identitaire profond dont la personne fait partie. En inuktitut, le mot «Nuna », que l'on retrouve dans Nunavik, Nunavut ou Nunaat est traduit à défaut par terre mais en réalité, rend bien la perception que les inuits ont de leur territoire (Rodon, 2017).

Recommandation n°1

Impliquer les acteurs locaux est essentiel. Identifier tous les acteurs susceptibles d'être impactés par le projet, les réunir et définir ensemble les étapes de développement et les critères dans un processus de sélection d'une solution.

3.1.2 La biodiversité

Tel qu'évoqué dans la revue de littérature (page 23) et confirmé dans la discussion de l'article (page 66), une solution unique ne devrait pas répondre à tous les besoins en énergie de Kuujjuaq. La diversité apporte une plus grande capacité d'adaptation envers les aléas. Cette observation peut être transposée à toute échelle et l'exemple le plus parlant est l'importance de la biodiversité sur terre. La diversité des espèces toutes confondues est ce qui assure la capacité des écosystèmes à retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation. Le mixe énergétique d'un pays, d'une province ou d'un village devrait suivre ce paradigme afin d'obtenir de l'indépendance et une marge de manœuvre en fonction de la mouvance des événements (changements de politiques, évolutions des coûts, disponibilité des ressources, etc.).

Recommandation n°2

Il n'y a pas de solution unique et un panel de solutions sera plus résilient et plus apte à résoudre un problème à long terme. De plus, la mixité des solutions peut s'intégrer dans le temps et suivre les avancées technologiques.

3.1.3 La décroissance

Le portrait actuel de la situation au Nunavik a été dressé dans le chapitre revue de littérature. Il a été statué que la situation actuelle demandait des améliorations mais il faut également garder en tête la forte croissance démographique et économique de la région. Par conséquence, la demande énergétique tend à augmenter. Afin de répondre au mieux à cette demande, il est

essentiel de limiter cette croissance par l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments, par l'optimisation des procédés actuellement mis en place voir par un cadre réglementaire plus stricte par rapport à l'utilisation énergétique.

Recommandation n°3

L'efficacité énergétique des maisons est une priorité, un programme de réhabilitation est requis. Par ailleurs, des normes plus strictes d'efficacité doivent aussi être implantées lors de la construction de nouvelles habitations et planifier en fonction de la réhabilitation des infrastructures.

3.1.4 Économie circulaire

Dans une démarche d'économie circulaire, les ressources locales devraient être privilégiées. Les résultats de l'étude démontrent que selon les critères choisis l'importation de granule de bois est la solution la plus viable à installer. D'un point de vue probabilité de réussite et certitude de succès, les fournaises individuelles aux granules de bois sont bien placées. La valorisation des déchets en revanche représente un plus grand défi car cela implique plus d'acteurs et des changements plus drastiques dans le quotidien de la communauté. En retour cela répond à une autre problématique liée à la gestion des déchets qui permettrait la mise en place d'une économie circulaire autour des matières résiduelles. La gazéification des déchets est une manière de valoriser la partie combustible des déchets ménagers mais d'autres solutions pourraient être mise en place à moyen terme pour tirer profit un maximum de ce qui aujourd'hui représente un problème à régler.

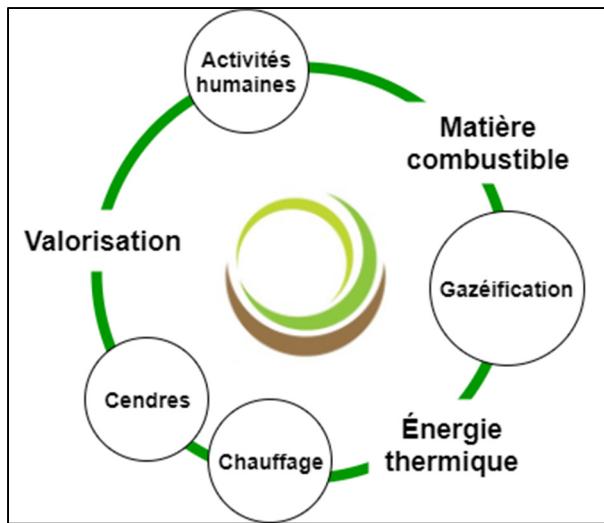


Figure 3-1: Représentation du cycle de valorisation entre les déchets combustibles, la gazéification et les activités humaines

La Figure 3-1 représente la valorisation possible des déchets de type combustible par la gazéification. L'énergie thermique issu du procédé permet de chauffer des bâtiments et les cendres résultantes peuvent éventuellement servir aux activités d'agriculture en serre si présentes.

Recommandation n°4

Les ressources locales sont à privilégier. Les déchets représentent une source d'énergie jusqu'alors inexploitée et devrait être considérés en premier dans une approche multi-filière.

3.1.5 Étalement urbain

L'étalement urbain est un problème prépondérant autour des mégapoles mais soulèvent des points importants dans le Nord en raison, entre autres, de l'impact sur les infrastructures telles que les routes et les réseaux. Plus les maisons sont éloignées les unes des autres, plus les coûts augmentent et l'occupation de terrain devient importante.

Les habitations individuelles entraînent des contraintes qui pourraient être atténuées par la construction des blocs collectifs de plus ou moins grande capacité. Des murs conjoints auraient un plus grand pouvoir isolant et il serait envisageable de mettre en commun la machinerie liée au chauffage de l'air de l'eau et à la gestion des eaux grises et noires. En effet le pergélisol représente un défi dans la construction au Nunavik et les maisons sont actuellement équipées de fournaises, de chauffe-eau et de réservoir d'eaux usés individuels (SHQ, 2012).

Recommandation n°5

Privilégier le regroupement des habitations et les bâtiments collectifs pour une mise en commun des ressources.

CONCLUSION

De nos jours les communautés isolées situées dans le grand Nord Canadien sont exclusivement alimentées en énergie grâce aux dérivés du pétrole. Cette situation engendre une dépendance aux énergies fossiles et à la fluctuation de leur prix et une vulnérabilité face aux accidents environnementaux liés aux déversements. Des études et des projets se développent de plus en plus pour trouver des alternatives à la production électrique par groupe électrogène et démontre un fort potentiel dans les énergies renouvelables telles que le vent et le soleil. Dans les bâtiments, l'accent est mis sur l'efficacité énergétique afin de réduire la consommation à la source. En revanche peu d'étude se penchent sur la production d'énergie thermique.

Dans ce contexte, une analyse multicritère a été réalisée dans le but de comparer des solutions de production thermique existantes afin de déterminer quelle serait l'alternative la plus adaptée à ce contexte particulier. L'analyse multicritère s'est imposée d'elle-même face à la multiplicité des acteurs mis en jeux, des objectifs à considérer, des alternatives envisagées et enfin des critères évalués. La littérature démontre que cette approche est populaire dans la planification énergétique et la méthode PROMETHEE est l'approche la plus adaptée à la présente problématique.

L'analyse préliminaire des alternatives existantes isolent quatre solutions : les fournaises aux granules, les fournaises au gaz naturel, la gazéification des déchets et retient la solution existante pour comparaison, les fournaises au mazout. Douze critères d'évaluation ont été sélectionnés pour représenter les trois pôles d'intérêts : l'environnement, le social et l'économique. Les résultats démontrent que les fournaises aux granules représentent l'alternative la plus intéressante aux fournaises au mazout selon tous les scénarios. En second, la gazéification des déchets représente une alternative attrayante d'un point de vue global et environnemental mais les fournaises au mazout sont privilégiées si on prend d'abord en considération les aspects sociales et économiques. Enfin le gaz naturel est la solution la moins

intéressante notamment en termes de coûts car les infrastructures de Kuujjuaq ne sont pas adaptées à une telle technologie.

L'étude démontre qu'il est possible de remplacer une partie du pétrole utilisé dans les communautés isolées du Nord. La littérature démontre qu'il y a des alternatives dans la production électrique également, il ne restera plus que l'utilisation des transports comme demande en énergie fossile.

ANNEXE I

Résultats détaillés des analyses de sensibilité

Le tableau suivant présente le détail des résultats de la deuxième analyse multicritère sur les données d'entrée. Telle que décrite dans le chapitre 1.3.4, chaque donnée a été manipulée afin d'identifier l'intervalle dans lequel la valeur peut varier sans changer le classement final. Ces résultats alimentent la discussion présentée à la fin de l'article.

Tableau A3-1: Résultats de l'analyse de sensibilité sur le tableau de performance

Critère	Valeur	Mazout	Granules	Gaz naturel	Gazéification des déchets
Impact CO ₂ eq. du combustible	v	89 078	12 473	58 780	
	v_{min}	7 000	0	0	
	v_{max}	∞	97 000	∞	
Émissions NOx	v	67,78	95,56	38,89	88,10
	v_{min}	0	30,00	0	0
	v_{max}	∞	∞	∞	∞
Émissions SO ₂	v	166,67	131,11	30,83	2,05
	v_{min}	21,7	0	0	0
	v_{max}	∞	∞	∞	143
Émissions PM	v	7,50	36,67	1,33	0,61
	v_{min}	0	2,50	0	0
	v_{max}	∞	∞	∞	34,50
Dommage en cas de déversement	v	Very high	Very low	Moderate	Very Low
	v_{min}	-	-	-	-
	v_{max}	-	-	-	Very high
Complexité d'opération	v	Very low	Low	High	Moderate
	v_{min}	-	-	-	-
	v_{max}	-	Very high	-	-
Changement des habitudes	v	Very low	Low	Very high	High
	v_{min}	-	-	-	-
	v_{max}	-	-	-	-
Retombées locales	v	Low	High	Moderate	Very high
	v_{min}	-	Low	-	Moderate
	v_{max}	Moderate	-	-	-

Tableau A3-1 (suite)

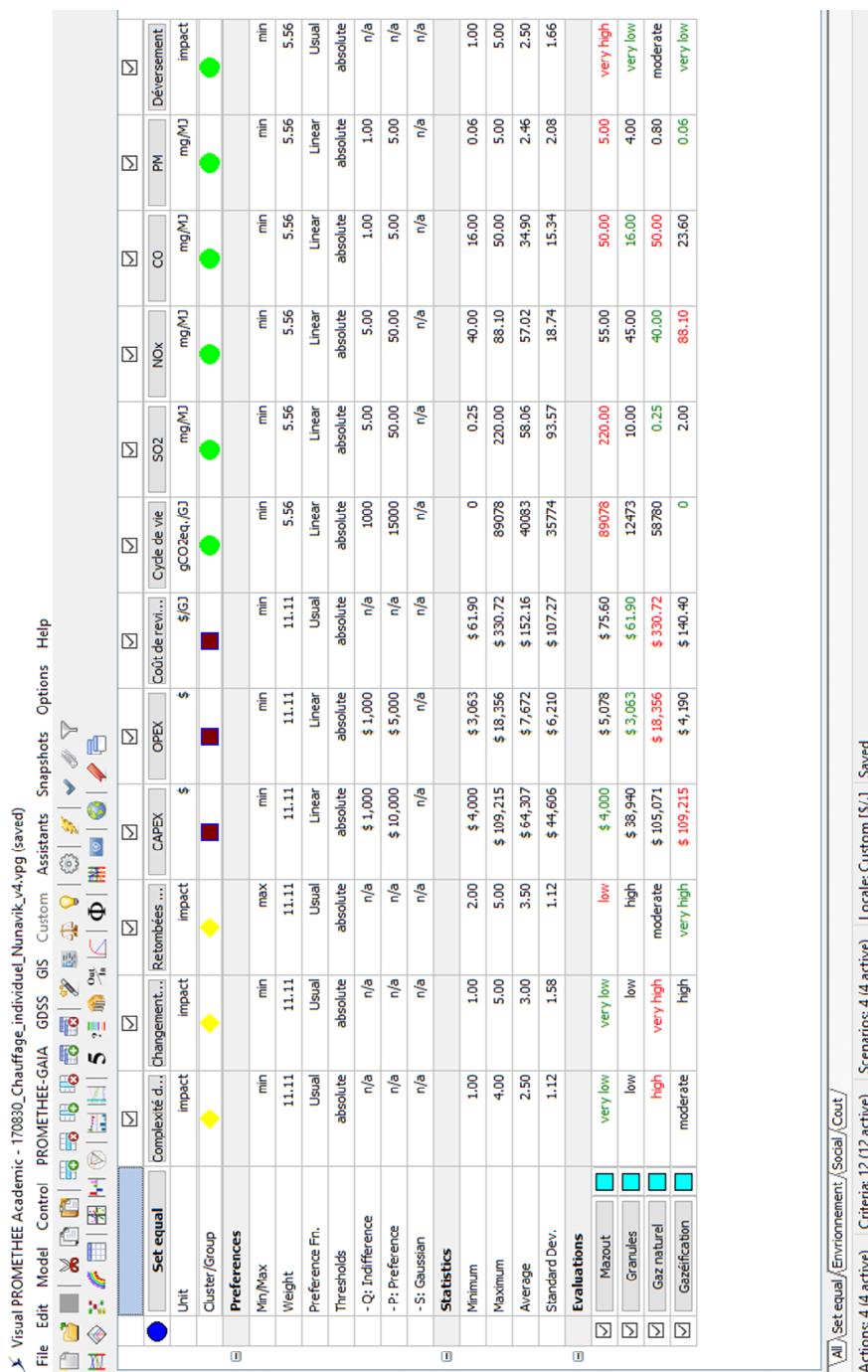
Critère	Valeur	Mazout	Granules	Gaz naturel	Gazéification des déchets
CAPEX	v	4 000	38 940	55 071	9 215
	v_{min}	0	8 500	0	0
	v_{max}	∞	∞	∞	40 500
OPEX	v	5 078	3 011	18 408	4 190
	v_{min}	0	0	0	0
	v_{max}	∞	9 200	∞	9 000
Coût de revient sur 20 ans	v	75,60	61,20	296,70	99,30
	v_{min}	61,20	0	0	0
	v_{max}	∞	75,60	∞	∞

Dans l'ensemble peu de données sont sensibles et aucun changement drastique n'est observé.

On s'aperçoit que les résultats pour le gaz naturel sont tellement inférieurs par rapport aux autres, qu'aucun changement de valeur ne fait varier le classement final. Cela valide entièrement le classement de la solution gaz naturel en dernier.

ANNEXE II

PROMETHEE interface



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anon. 2007. *Décision régie de l'énergie Québec. -2007-103.* <<http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/decisions/D-2007-103.pdf>>. Consulté le 28 septembre 2017.
- Anon. 2017. « Développement d'un projet-pilote de valorisation énergétique des matières résiduelles et de serre commerciale à Kuujjuaq ». In *Plan Nord*. <<https://plannord.gouv.qc.ca/fr/salle-de-presse/developpement-dun-projet-pilote-de-valorisation-energetique-matieres-residuelles-de-serre-commerciale-a-kuujjuaq/>>. Consulté le 28 septembre 2017.
- Arctic Energy Alliance. 2013. « Biomass District Heating Videos ». <<http://aea.nt.ca/blog/2013/07/biomass-district-heating-videos>>. Consulté le 27 janvier 2017.
- Arena, Umberto. 2012. « Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review ». *Waste Management*, vol. 32, n° 4, p. 625- 639. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>>.
- Arsenault, John W. 2016. « Approvisionnement des granules ». In *Conférence sur le chauffage à la biomasse forestière résiduelle 2016*. (2016). <http://www.quebecwoodexport.com/images/stories/pdf/Caracteristiques_granules_final.pdf>. Consulté le 23 janvier 2017.
- Barrett, Michael et Frédéric Gagné. 2013. *Plan de gestion des matières résiduelles du Nunavik. Kuujjuaq : Administration régionale KATIVIK.* <http://www.krg.ca/images/stories/docs/Residual%20Material%20Management%20Plan/PGRM%20final_allege_fr.pdf>. Consulté le 13 juin 2017.
- Belton, Valerie et Theodor Stewart. 2002. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*, Kluwer Academic Publishers. Springer Science & Business Media, 408 p.
- BiogasWorld. 2017. « BiogasWorld | Connecting the biogas industry ». In *BiogasWorld*. <<https://www.biogasworld.com/>>. Consulté le 17 novembre 2017.
- Boute, Anatole. 2016. « Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: An analysis of the Russian Far East ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, n° Supplement C, p. 1029- 1037. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.034>>.
- Bouzarour-Amokrane, Yasmina. 2013. « Structuration des processus d'aide à la décision par analyse bipolaire ». Toulouse, Toulouse 3, 176 p. <<http://www.theses.fr/2013TOU30296>>. Consulté le 20 avril 2017.

- BP. 2017. *BP statistical review of world energy 2017*. <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Consulté le 7 décembre 2017.
- Brans, J. P., Ph. Vincke et B. Mareschal. 1986. « How to select and how to rank projects: The Promethee method ». *European Journal of Operational Research*, vol. 24, n° 2, p. 228-238.
- Buchholz, Thomas, Ewald Rametsteiner, Timothy A. Volk et Valerie A. Luzadis. 2009. « Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments ». *Energy Policy*, vol. 37, n° 2, p. 484- 495. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.054>>.
- Burnham, Andrew, Jeongwoo Han, Corrie Clark et Ignasi Palou-Rivera. 2012. « Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Shale Gas, Natural Gas, Coal, and Petroleum (vol 46, pg 619, 2012) ». *ACS Publications*, vol. 46, p. 619- 627.
- Cambero, Claudia, Mariane Hans Alexandre et Taraneh Sowlati. 2015. « Life cycle greenhouse gas analysis of bioenergy generation alternatives using forest and wood residues in remote locations: A case study in British Columbia, Canada ». *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 105, p. 59- 72. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.014>>.
- Canadian furnace prices. 2017. « High-Efficiency Furnace Prices, Comparison & Free Quotes ». In *Furnace Prices Canada*. <<https://www.furnaceprices.ca/>>. Consulté le 15 mai 2017.
- CANMET Energy. 2005. *Clean energy project analysis: Retscreen engineering & cases textbook. Biomass heating project analysis chapter*. Natural Resources Canada.
- Catalina, Tiberiu, Joseph Virgone et Eric Blanco. 2011. « Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology ». *Renewable Energy*, vol. 36, n° 8, p. 2245- 2252. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.011>>.
- Chen Y., Fazio P., Athienitis A. K. et Rao J. 2012. « Sustainable Building Design in Cold Regions: High Performance Envelope and Façade-Integrated Photovoltaic/Solar Thermal Systems at High Latitudes ». *Cold Regions Engineering 2012*, p. 199- 209. <<https://doi.org/10.1061/9780784412473.020>>.
- Claisse, M. et M. Briand. 2007. « Renewable energy study for isolated N. Québec villages ». *International journal on hydropower and dams*.
- CME Group. 2017. « Henry Hub Natural Gas Futures ». In *CME Group*. <<http://www.cmegroup.com/trading/energy/natural-gas/natural-gas.html>>. Consulté le 16 mai 2017.
- Constantineau, Jérôme. Unpublished results. *Storage and regasification systems - North of Québec*.

- Curry, N. et P. Pillay. 2014. « Electric generators for biomass waste to energy systems ». In *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*. (2014), p. 1- 4. <<https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939268>>.
- Dave, DAEG et Abdel E. Ghaly. 2011. « Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis ». *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 7, n° 5, p. 423.
- Deslauriers, Jean-Claude. 2015. *La réduction des coûts des réseaux autonomes du Nunavik par le déploiement de la production photovoltaïque*. Québec : S.É-AQLPA.
- Dessureault, Pierre-Luc, Vincent Grégoire et Hélène Côté. 2014. *Gestion des matières résiduelles en territoire nordique : Portrait de la situation*. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi.
- Dimitriou, A., P. Kotsampopoulos et N. Hatziargyriou. 2014. « Best practices of rural electrification in developing countries: Technologies and case studies ». In *MedPower 2014*. (2014), p. 1- 5. <<https://doi.org/10.1049/cp.2014.1658>>.
- Duhame, Gérard, Andrée Caron et Sébastien Lévesque. 2015. *Nunavik en chiffres*. ISBN: 978-2-921438-96-4. Québec : Chaire de recherche du Canada sur la condition autochtone comparée, 21 p.
- EEA. 2011. « Specific CO₂ emissions per tonne-km and per mode of transport in Europe, 1995-2011 ». In *European Environment Agency*. <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/specific-co2-emissions-per-tonne-2>>. Consulté le 28 août 2017.
- Equilibrium. 2008. *Riverdale NetZero house - Project profile*. <http://riverdalenetzero.ca/Riverdale_NetZero_house_--_project_profile.pdf>. Consulté le 1 décembre 2017.
- Esen, Mehmet et Tahsin Yuksel. 2013. « Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse ». *Energy and Buildings*, vol. 65, n° Supplement C, p. 340- 351. <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.018>>.
- European parliament. 2010. *Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19th May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>>. Consulté le 30 novembre 2017.
- Fournier, Watson. Communication personnelle. *Projet de recherche de communauté nordique net-zéro*.
- FQCF. 2013. *Filière de la biomasse forestière destinée à la production de chaleur*. Fédération québécoise des coopératives forestières.

- French, Simon. 2003. « Modelling, making inferences and making decisions: The roles of sensitivity analysis ». *TOP: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, vol. 11, n° 2, p. 229- 251. <<https://doi.org/10.1007/BF02579043>>.
- Gaspar, Henrique M., Sören Ehlers, Vilmar Æsøy, Sandro Erceg, Océane Balland et Hans Petter Hildre. 2014. « Challenges for Using LNG Fueled Ships for Arctic Routes ». In *33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. (San Francisco, California, USA, 8 juin 2014), p. 10. <<https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23914>>.
- Ghafghazi, S., T. Sowlati, S. Sokhansanj et S. Melin. 2010. « A multicriteria approach to evaluate district heating system options ». *Applied Energy*, vol. 87, n° 4, p. 1134- 1140. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>>.
- Grandmont, K., D. Fortier et J. A. Cardille. 2012. « Multi-Criteria Analysis with Geographic Information Systems in Changing Permafrost Environments: Opportunities and Limits ». In *Cold Regions Engineering 2012*. (19 septembre 2012). <<https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784412473.066#sthash.p90i34uP.dpuf>>. Consulté le 3 juillet 2017.
- Henriet, Laurent. 2000. « Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision : Construction de modèles et procédures d'affectation ». phdthesis, Université Paris Dauphine - Paris IX. <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00528799/document>>. Consulté le 20 avril 2017.
- Hydro-Québec. 2001. *Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000*. Hydro-Québec.
- Hydro-Québec. 2015. « Fuite restreinte et confinée à Inukjuak ». <<http://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiques-de-presse/884/fuite-restreinte-et-confinee-a-inukjuak>>. Consulté le 17 novembre 2017.
- Hydro-Québec. 2017a. « L'énergie hydrolienne | Les énergies renouvelables ». In *Hydro-Québec*. <<http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/energie-hydrolienne.html>>. Consulté le 10 novembre 2017.
- Hydro-Québec. 2017b. « Histoire de l'énergie éolienne au Québec | Hydro-Québec ». <<http://www.hydroquebec.com/comprendre/eolienne/historique-eolien-hydroquebec.html>>. Consulté le 28 septembre 2017.
- Hydro-Québec distribution. 2011. *Réseaux autonomes - Portrait d'ensemble et perspectives d'avenir*. 32 p.
- Hydro-Québec distribution. 2013. *Potentiel technico-économique d'efficacité énergétique dans les réseaux autonomes - Évaluation 2012*.

Hydro-Québec distribution. 2016. *Plan d'approvisionnement 2017-2026 - Réseaux autonomes.*

Ibrahim, H., R. Younès, A. Ilinca, D. Ramdenee, M. Dimitrova, J. Perron, M. Adegnon, D. Boulay et C. Arbez. 2011. « Potential of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed air system for Nordic Remote Canadian Areas ». *Energy Procedia*, vol. 6, p. 795- 804. <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.090>>.

IEA. 2017a. *CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights 2017*. International Energy Agency. <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>>. Consulté le 7 décembre 2017.

IEA. 2017b. *Oil Information 2017 Overview*. Internation Energy Agency. <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/OilInformation2017Overview.pdf>>. Consulté le 7 décembre 2017.

International polar foundation. 2016. « Home - Princess Elisabeth Antarctica Research Station ». <<http://www.antarcticstation.org/>>. Consulté le 30 novembre 2017.

Jobidon, Robert et Yves Bergeron. 2013. *Limite Nordique des forêts attribuables*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 148 p.

Kontu, Kaisa, Samuli Rinne, Ville Olkkonen, Risto Lahdelma et Pekka Salminen. 2015. « Multicriteria evaluation of heating choices for a new sustainable residential area ». *Energy and Buildings*, vol. 93, p. 169- 179. <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.003>>.

Krupa, Joel. 2012. « Identifying barriers to aboriginal renewable energy deployment in Canada ». *Energy Policy*, vol. 42, p. 710- 714.

Kumar, Abhishek, Bikash Sah, Arvind R. Singh, Yan Deng, Xiangning He, Praveen Kumar et R. C. Bansal. 2017. « A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, p. 596- 609.

Labbé, M. Sylvain. 2014. « Évaluation de l'empreinte carbone de différents scénarios d'approvisionnement de centrales thermiques en granules de bois ». *CIRAIQ*. <http://www.quebecwoodexport.com/images/stories/pdf/Pi196_QWEB_Granules_Report_final_2014-10-17.pdf>. Consulté le 23 janvier 2017.

Laganière, Jérôme, David Paré, Evelyne Thiffault et Pierre Y. Bernier. 2017. « Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests ». *GCB Bioenergy*, vol. 9, n° 2, p. 358- 369. <<https://doi.org/10.1111/gcbb.12327>>.

- Lefevre, R. J. 2016. « Energy Generation Using Water Resources: Greening the Environment ». In *2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. (2016), p. 40- 44. <<https://doi.org/10.1109/GreenTech.2016.15>>.
- Madrali, Sebnem. 2016. « Canadian bioheat survey ». In *BioCleantech Forum*. (Ottawa, 2016).
- Majorowicz, Jareck A et Vasile Minea. 2015. « Geological, Economical and Environmental Assessment of Combined Geothermal Power and Heat Generation in Québec, Canada ». In *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. (Melbourne, 2015).
- Makivik Corporation. 2017a. « Cartes du Nunavik ». *Makivik Corp.* <<http://www.makivik.org/fr/nunavik-maps/>>. Consulté le 28 septembre 2017.
- Makivik Corporation. 2017b. « Makivik and FCNQ Sign Historic Agreement to Create New Company to Develop Renewable Energy in Nunavik ». *Makivik Corp.* <<http://www.makivik.org/makivik-fcnq-sign-historic-agreement-create-new-company-develop-renewable-energy-nunavik/>>. Consulté le 27 juin 2017.
- Mareschal, B. 2011. « PROMETHEE & GAIA Software ». <<http://www.promethee-gaia.net/software.html>>. Consulté le 19 juin 2017.
- Mazzola, S., M. Astolfi et E. Macchi. 2015. « Techno-economic optimization of a stand-alone hybrid microgrid for the rural electrification in Sub Saharan Africa ». <<http://repository.up.ac.za/handle/2263/49574>>. Consulté le 15 juillet 2016.
- MDDELCC. 2015. *Cible de réduction d'émissions de gaz à effet de serre du Québec pour 2030*. Gouvernement du Québec, 51 p.
- MERN. 2015. *Exigences techniques Novoclimat 2.0 - Volet maison et petit bâtiment multilogement*. Novoclimat 2.0.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2006. *La stratégie énergétique du Québec 2006-2015*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Mohammed, Y. S., M. W. Mustafa et N. Bashir. 2014. « Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, n° Supplement C, p. 527- 539. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.022>>.
- Mouine, Mohamed. 2011. « Combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité ». Maîtrise, Québec, Université Laval, 91 p. <<http://theses.ulaval.ca/archimede/meta/27885>>. Consulté le 26 avril 2017.
- Moutquin, Eric. Personal communication. *Intro - info sur les bâtiments du grand nord*.
- NEAS. 2017. « NEAS ». <<http://www.neas.ca/>>. Consulté le 17 novembre 2017.

- Neuvoo. 2017. « Salaire Kuujjuaq ». In *Neuvoo*. <<http://neuvoo.ca/salaire/kuujjuaq/>>. Consulté le 2 juin 2017.
- Opinion Impact Inc. 2015. *Utilisation de l'électricité selon le profil de consommation de la clientèle résidentielle du Nunavik*. Montréal.
- Pa, Ann, Jill S. Craven, Xiaotao T. Bi, Staffan Melin et Shahab Sokhansanj. 2012. « Environmental footprints of British Columbia wood pellets from a simplified life cycle analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, n° 2, p. 220- 231. <<https://doi.org/10.1007/s11367-011-0358-7>>.
- Paré, David, Pierre Bernier, Evelyne Thiffault et Brian D. Titus. 2011. « Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie pour le Canada ». *The forest chronicle*, vol. 87, n° 3, p. 346- 350.
- Plan Nord. 2017a. « Développement d'un projet-pilote de valorisation énergétique des matières résiduelles et de serre commerciale à Kuujjuaq ». In *Plan Nord*. <<https://plannord.gouv.qc.ca/fr/salle-de-presse/developpement-dun-projet-pilote-de-valorisation-energetique-matieres-residuelles-de-serre-commerciale-a-kuujjuaq/>>. Consulté le 16 novembre 2017.
- Plan Nord. 2017b. « Société du plan nord ». In *Plan Nord*. <<https://plannord.gouv.qc.ca/fr/spn/>>. Consulté le 16 novembre 2017.
- Pohekar, S. D. et M. Ramachandran. 2004. « Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, n° 4, p. 365- 381.
- Rahman, Md. Mustafizur, Md. Mohib-Ul-Haque Khan, Mohammad Ahsan Ullah, Xiaolei Zhang et Amit Kumar. 2016. « A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community ». *Energy*, vol. 97, p. 151- 160. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.105>>.
- Rahman, Rezaur. 2014. « Feasibility analysis of wood-biomass energy generation for the off-grid community of Brochet in North-west Manitoba, Canada. » Master degree, Winnipeg, University of Manitoba, 156 p.
- Rashid, A., N. Hasan, K. T. Parvez et M. N. I. Maruf. 2015. « Study and analysis of a small scale micro-grid using renewable energy resources ». In *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*. (2015), p. 1- 4. <<https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307339>>.
- Régie du bâtiment du Québec. 2012. *Présentation sur le règlement modifiant le code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique*.

- Reiss, Robert. 2006. *Le gaz naturel liquéfié*.
- RNCan. 2011. « Gaz naturel ». In *Gouvernement du Canada*. <<https://www.rncan.gc.ca/energie/gaz-naturel/5640>>. Consulté le 3 juillet 2017.
- RNCan. 2013a. « Remote Communities Database ». <<https://www2.nrcan-rncan.gc.ca/eneene/sources/rcd-bce/index.cfm?fuseaction=admin.home1>>. Consulté le 28 novembre 2016.
- RNCan. 2013b. « Calculateur de GES bioénergie ». <<https://apps-scf-cfs.rncan.gc.ca/calc/fr/calculateur-bioenergie>>. Consulté le 27 janvier 2017.
- RNCan. 2016. « À propos de l'énergie renouvelable | Ressources naturelles Canada ». <<http://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296>>. Consulté le 30 octobre 2017.
- Rodon, Thierry. 2017. *MOOC La Québec nordique: enjeux, espaces et cultures 1ère édition*. Québec : Institut nordique du Québec.
- Rojas-Zerpa, Juan C. et Jose M. Yusta. 2015. « Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, n° Supplement C, p. 557- 571. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.139>>.
- SHQ. 1994. « Habitation autochtone ». <<http://www.habitation.gouv.qc.ca/fileadmin/internet/documents/SHQ/U3-1994.pdf>>. Consulté le 5 avril 2017.
- SHQ. 2012. *Enjeux dans la construction de logements au Nunavik*. 46 p.
- SHQ. 2013. *Le bulletin d'information de la société d'habitation du Québec*. Québec : Société d'habitation du Québec. <<http://www.habitation.gouv.qc.ca/fileadmin/internet/publications/0000022927.pdf>>. Consulté le 7 décembre 2017.
- Siddaiah, Rajanna et R. P. Saini. 2016. « A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, n° Supplement C, p. 376- 396. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>>.
- Solomatnikova, Olga. 2011. *Technologies de bioénergies à base de biomasse forestière*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 190 p.
- Solomatnikova, Olga. 2012. « Technologies de bioénergies à base de biomasse forestière et leurs impacts sur la qualité de l'air ». In *Contrôle des émissions et assainissement de l'atmosphère*. (2012).
- Stefan, Hirschberg. 2004. « Order in the Eco-Inventory Jungle ». *Énergie-Spiegel*, n° 11, p. 4.

- Steinsvik Arkitektkontor AS. 2004. « Arkitekturguide for Nord-Norge og Svalbard ». <http://arkitekturguide.uit.no/details.php?image_id=1394>. Consulté le 1 décembre 2017.
- Stephen, James D., Warren E. Mabee, Amadeus Pribowo, Sean Pledger, Randy Hart, Sheldon Tallio et Gary Q. Bull. 2016. « Biomass for residential and commercial heating in a remote Canadian aboriginal community ». *Renewable Energy*, vol. 86, p. 563- 575. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.048>>.
- Surisetty, Venkateswara Rao, Janusz Kozinski et Ajay Kumar Dalai. 2012. « Biomass, availability in Canada, and gasification: an overview ». *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 2, n° 1, p. 73- 85. <<https://doi.org/10.1007/s13399-011-0024-0>>.
- Suzuki, David et Ian Hanington. 2011. « Le gaz naturel n'est pas la solution ». In *Fondation David Suzuki*. <<https://fr.davidsuzuki.org/blogues/gaz-naturel-nest-solution/>>. Consulté le 17 novembre 2017.
- Terragon. Unpublished results. *Cost calculator MAGS*.
- Thompson, Shirley et Bhanu Duggirala. 2009. « The feasibility of renewable energies at an off-grid community in Canada ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 9, p. 2740- 2745. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.027>>.
- Vision Biomasse Québec. 2015. *Le chauffage à la biomasse forestière résiduelle*. Vision Biomasse Québec, 17 p.
- Vladykova P., Rode C., Kragh J. et Kotol M. 2012. « Low-Energy House in Arctic Climate: Five Years of Experience ». *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 26, n° 3, p. 79- 100. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000040)>.
- Weis, Timothy M., Adrian Ilinca et Jean-Paul Pinard. 2008. « Stakeholders' perspectives on barriers to remote wind–diesel power plants in Canada ». *Energy Policy*, vol. 36, n° 5, p. 1611- 1621. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.004>>.
- World Energy Council. 2016. *Resources Summary Report 2016*. London : World Energy Council, 46 p. <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_SummaryReport_2016.pdf>. Consulté le 26 avril 2017.
- ZEB. 2017. « About the ZEB Centre ». <<http://www.zeb.no/index.php/en/about-zeb/about-the-zeb-centre>>. Consulté le 30 novembre 2017.

