

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**LOGISTIQUE DE L'INSTALLATION ET DE
L'EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN
SITE ISOLÉ NORDIQUE**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en ingénierie

Pour l'obtention du grade de maître en sciences appliquées

(M.SC. A)

PAR

© **SANDRA YALEKO KONGO**

Août 2016

Composition du jury :

Hussein Ibrahim, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Drishty Singh Ramdenee, examinateur externe, ITMI

Dépôt initial le 10 août 2016

Dépôt final le 25 janvier 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

DÉDIDACE

*JE DÉDIE CE TRAVAIL À LA MÉMOIRE DE PERSONNES PARTIES TROP TÔT ;
MON PÈREKONGO CONSTANT, MON FRÈRE BOBO KONGO, MON NEVEU
JOHNNY MBINDOLO ET MON AMIDAVE PROULX.*

*À MA MAMAN CHÉRIE YAMAKASI SIDONIE, À MES FRÈRES ET SOEURS
CONSTANTINE, JOE, LINA ACHILLE, ZIZINA, KETTY, BENZ, MARIE-FRANCE, ET
PETRONIE KONGO.*

À TOUS MES NEVEUX ET NIÈCES.

YALEKO KONGO SANDRA

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à mon directeur de recherche, Mr Adrian Ilinca, pour son excellent travail de supervision et sa disponibilité.

Je remercie également l'équipe de Tugliq énergie Mr Justin Bulota et Jérémie Barriault qui m'ont permis d'avoir accès aux données pertinentes sur le site d'exploitation éolienne de la mine Raglan pour une mise en contexte du projet.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

YALEKO KONGO SANDRA

RÉSUMÉ

Le présent projet porte sur la logistique entourant le déploiement des énergies vertes en milieu nordique et isolé, et ce, pour des sites isolés desservis par des groupes Diesel. Ce choix tient du fait de la politique de réduction des émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère surtout dans la production de l'énergie.

Dans ce contexte, la logistique employée a pour but d'assurer la viabilité et la durabilité d'un projet d'énergies renouvelables en milieu nordique isolé. Le milieu nordique pose un certain nombre de barrières au déploiement des énergies vertes, d'où la nécessité de connaître les phénomènes atmosphériques propres au site d'exploitation afin d'assurer une meilleure rentabilité du projet. Il a fallu explorer différentes sources d'énergie verte disponibles en région nordique et voir à quel niveau le taux de pénétration en puissance permettrait la viabilité du projet.

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés en particulier à l'énergie éolienne et au solaire photovoltaïque, la première ayant obtenu un très bon taux de pénétration en puissance car ces régions nordiques possèdent un potentiel éolien exploitable. La seconde possède certaines qualités pour le fonctionnement en climat froid quoique les hivers longs et sombres restreignent le potentiel solaire. Cependant, durant les mois de l'été quand la ressource est abondante, elle s'avère être un bon compromis entre la charge électrique qui est réduite et la productivité du système photovoltaïque, outre le fait que la température ambiante améliore le fonctionnement des cellules. Les différentes technologies éoliennes et photovoltaïques existantes pour le milieu nordique ont été également explorées afin d'en déterminer les limites, l'apport d'une technologie par rapport à une autre, ou encore l'état de l'art dans le domaine.

La logistique, elle, a été étudiée de manière générale. Ainsi, ne pouvant pas lui donner une seule définition, elle s'adapte selon le type d'application à laquelle elle est destinée. Dans ce contexte, nous avons exploré différents moyens logistiques mis en place pour des projets dans le milieu de froid extrême.

À titre d'exemple de mise en application, le cas du projet éolien de la mine Raglan a été étudié. Les résultats de la production ont été concluants ainsi que celles d'autres projets verts dans le Nord canadien. Ainsi, la réussite de ces projets permet à la filière des énergies vertes de s'étendre en milieu nordique prouvant dans le fait leur viabilité et durabilité en climat nordique.

ABSTRACT

This Project involves the logistics surrounding the deployment of green energy in northern and remote areas, and to remote sites served by diesel generators. This choice is due to the policy of reducing emissions of green house gases in the atmosphere especially in energy production.

In this context, the logistics aims to ensure the viability and sustainability of a renewable energy project in isolated northern communities. The Nordic environment poses a number of barriers to the deployment of green energy, hence the need to know the specific weather patterns to the operating site to ensure better return on investment. Therefore, an exploration of various green energy sources available was necessary in Nordic region and then investigating at what level the rate of power penetration allows the viability of the Project.

In this project, we focused particularly on wind power and solar photovoltaics. The first having obtained a good potential penetration rate in power for these northern regions have a good exploitable wind potential. The second has some peculiarity of operation in cold climates since the long, dark winters restrict solar potential. However, during summer months when the resource is abundant, it turns out to be a good compromise between the electric charge, which is reduced in summer and the production of the photovoltaic system. Moreover, it is factual that the ambient temperature improves the operation of the cell. Different wind and photovoltaic technologies that already exist for northern environments have also been explored to assess their limits, the contribution of one technology over another, or the state of the art in the field.

Logistics has been generally assessed; henceforth one single definition cannot be assigned to it. It will therefore fit with the type of application for which it is intended in a given context. Therefore, we have explored different logistics set up for projects in the extreme cold region. For example, the implementation of the wind project in the Raglan mine was studied. The production results were conclusive as well as other green projects in Northern Canada. Thus, the success of these projects allows the green energy industry to expand in the North proving the viability and sustainability of green technology in northern climates.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	VIII
RÉSUMÉ.....	IX
ABSTRACT	X
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	XVIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 ALIMENTATION EN ÉNERGIE DES RÉGIONS NORDIQUES ET ISOLÉES.....	5
1.1 RAPPEL SUR LE RESEAU ELECTRIQUE	5
1.2 FONCTIONNEMENT D’UN RESEAU ELECTRIQUE	7
1.3 CHOIX DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE POUR LES SITES ISOLEES NORDIQUES	8
1.4 SYSTEME HYBRIDE	9
1.5 SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE	10
1.6 CONCLUSION	13
CHAPITRE 2 CLIMAT NORDIQUE ET EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES.....	15
2.1 CARACTERISTIQUES DU CLIMAT FROID.....	15

2.2	ÉNERGIES RENOUVELABLES ADAPTEES POUR LE CLIMAT FROID.....	16
2.2.1	SOURCES D'ENERGIE ACTUELLES	18
2.2.2	ANALYSES DE SOURCES RENOUVELABLES	18
2.3	ANALYSES DE BARRIERES LIEES AU DEPLOIEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN CLIMAT FROID.....	23
2.4	EXEMPLE D'EXPLOITATION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN REGION NORDIQUE : CAS DE LA MINE DIAVIK ET RAGLAN, EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE... ..	27
2.4.1	PROJET EOLIEN DE LA MINE DIAVIK.....	27
2.4.2	PROJET EOLIEN DE LA MINE RAGLAN.....	34
2.5	CONCLUSION.....	40
 CHAPITRE 3 LOGISTIQUE ADAPTÉE AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN RÉGIONS NORDIQUES ET ISOLÉES.....		41
3.1	INTRODUCTION	41
3.2	PRESENTATION DE LA LOGISTIQUE EN REGION NORDIQUE.....	43
3.2.1	LES COMPOSANTES DE LA LOGISTIQUE EN REGION NORDIQUE.....	43
3.2.2	CRITERES D'EVALUATION DES COMPOSANTES LOGISTIQUES	46
3.3	IDENTIFICATION DES DOMAINES D'ACTIVITES DANS LES REGIONS ISOLEES NORDIQUES ET ISOLEES LOGISTIQUES APPLIQUEES.....	46
3.3.1	POUR LES AUTOCHTONES	48
3.3.2	POUR LA RECHERCHE	49
3.3.3	POUR LES INDUSTRIES	49
3.4	MODELE DE PLANIFICATION POUR PROJET EN REGION NORDIQUE ET ISOLEE.....	50
3.5	MODELE DE PLANIFICATION POUR PROJET DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN REGION NORDIQUE ET ISOLEE.....	53
3.6	LOGISTIQUE ET OUTILS INFORMATIQUES	55
3.6.1	TEMPS D'EXECUTION DU PROGRAMME.....	57
3.6.2	PROGRAMMATION LINEAIRE.....	59

3.7	HIERARCHISATION DE PRIORITES.....	60
3.8	ORDONNANCEMENT DES TACHES	60
3.8.1	METHODE DE POTENTIELS METRA.....	61
3.8.2	METHODE DE PERT	62
3.9	ETUDE DE CAS : PLANIFICATION LOGISTIQUE DU PROJET EOLIEN DE LA MINE RAGLAN.....	63
3.9.1	POUR LA PHASE PRE-OPERATIONNELLE	64
3.9.2	ÉLÉMENTS D’OPTIMISATION DE LA LOGISTIQUE D’INSTALLATION.....	67
3.9.3	POUR LA PHASE OPERATIONNELLE.....	73
3.9.4	POUR LE DEMANTELEMENT	73
3.10	CONCLUSION	74

CHAPITRE 4 EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN RÉGIONS NORDIQUES ISOLÉES : CAS DE L’ÉOLIEN ET DU PHOTOVOLTAÏQUE.....		75
--	--	-----------

4.1	INTRODUCTION.....	75
4.2	CAS DE L’EOLIEN : EXPLOITATION DE L’ENERGIE EOLIENNE EN REGION NORDIQUE.....	75
4.2.1	CAPACITE INSTALLEE ET PREVISION EOLIENNE EN REGION FROIDE.....	76
4.2.2	ÉTAT DE L’ART	78
4.2.3	CLASSIFICATION DE SITES A CLIMAT FROID.....	81
4.2.4	CONTRAINTES LIEES AU CLIMAT SUR L’EXPLOITATION DE L’EOLIEN EN REGION NORDIQUE	87
4.2.5	TECHNOLOGIE ADAPTEE POUR LES REGIONS FROIDES ET RECOMMANDATIONS	90
4.2.6	UTILISATION DES MATERIAUX ET LUBRIFIANTS POUR BASSE TEMPERATURE.....	100
4.2.7	NORMES EXISTANTES ET EXIGENCE DE L’EOLIEN EN REGION FROIDE.....	101
4.3	CAS DU PHOTOVOLTAÏQUE : EXPLOITATION DE L’ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE EN REGION NORDIQUE ET ISOLEE	102

4.3.1	INTRODUCTION	102
4.3.2	APPLICATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN REGION ISOLEE NORDIQUE.....	104
4.3.3	INFLUENCE ET CONTRAINTE DU CLIMAT FROID SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	107
4.3.4	CAPTEURS D'ECLAIREMENT EN REGION FROIDE	111
4.3.5	TECHNIQUES PASSIVES DE DEGIVRAGE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	112
4.3.6	TECHNIQUES ACTIVES DE DEGIVRAGE DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES..	113
4.3.7	EXEMPLE D'EXPLOITATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN SITE ISOLE NORDIQUE	114
4.4	CONCLUSION.....	123
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	125
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste de tâches du projet	68
Tableau 2: Calcul de dates au plus tôt de tâche	69
Tableau 3: Calcul des dates au plus tard du projet	70
Tableau 4: Calcul de la marge totale et libre des tâches	71
Tableau 5: Classe du givre selon l'AIE avec recommandation.....	87
Tableau 6: Limite de température typique et recommandée pour la turbine	91
Tableau 7: Aperçu des technologies d'antigivrage et de dégivrage pour la turbine éolienne[34]	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Définition du climat froid	15
Figure 2: Plateforme de la structure	38
Figure 3: Les résultats après un mois d'essai d'opération.....	39
Figure 4: Processus de planification dynamique[21]	51
Figure 5: Système de planification des opérations logistiques en site isolé[21]	52
Figure 6: Le graphe de précédence	69
Figure 7: Graphe de précédence normalisée	72
Figure 8: identification des tâches critiques	72
Figure 9: Capacité installée et prévision éolienne en climat froid [Source: BTW mise à jour du marché mondial 2012].....	78
Figure 10: Climat glacial et à température basse en fonction de la température ambiante..	82
Figure 11: Définition du givrage météorologique et sur instrument [32]	85
Figure 12: Exemple d'effondrement d'une tour météorologique en raison du poids du givre[34]	85
Figure 13: Climat glacial et à température basse en fonction de la température ambiante et de la conception de la turbine[34]	90
Figure 14: Indicateur de glace sur différents éléments aux alentours du site	92

Figure 15: augmentation du niveau sonore lors de l'accumulation de la glace sur le bord d'attaque de la pale d'éolienne.....	92
Figure 16: Capteur direct et indirect de glace.....	93
Figure 17: Comparaison de l'efficacité de la cellule PV à taux d'éclairage faible.....	109
Figure 18: Façade du collège.....	115
Figure 19: Description du système[46].....	116
Figure 20: Efficacité des cellules Solec et Siemens[46].....	117
Figure 21: Efficacité mensuelle de l'onduleur[46].....	118
Figure 22: Efficacité et rendement mensuel des cellules PV.....	119
Figure 23: Champ photovoltaïque[47].....	121
Figure 24: Production des cellules PV pour l'année 2013.....	121
Figure 25: Production des cellules PV pour l'année 2014.....	122

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AIE Agence Internationale de l'Énergie

C Celsius

EIE Étude d'impact environnemental

ENR Énergie renouvelable

GD Groupe diesel

GES Gaz à effet de serre

GW Gigawatts

GWEC Global wind energy Council

IEC International Electrotechnical Commission

KV Kilovolts

KWh Kilowattheure

LWC Liquid water content

MV Megavolts

MVD Median volume diameter

N-O Nord- Ouest

NSF National Science Foundation

PERT Program evaluation and review technic

PIB Produit intérieure brute

PV Photovoltaïque

TEP Tonne équivalent pétrole

TWh Téra watt heure

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les sites isolés situés dans les régions nordiques ou ailleurs sont généralement desservis par les GD et n'échappent donc pas aux conséquences de l'exploitation de ce type de réseau. La problématique majeure liée à ce type réseau appelé communément « réseau autonome » est que le GD est responsable des émissions de GES, de la pollution de l'air ainsi que de la contamination du sol.

De plus, le coût de l'exploitation à long terme s'avère élever quoiqu'il ait été un choix adéquat vu l'éloignement du site du réseau principal de distribution. Bien que le GD ne soit pas cher à l'achat, le coût du combustible, lui, a augmenté au fil des années en plus du coût lié au transport pour l'acheminement de celui-ci au site cible ce qui rend dès lors l'exploitation onéreuse à long terme.

Pour réduire les effets sur l'environnement et le coût d'exploitation, l'option est d'hybrider le diesel avec une autre source non émettrice de GES, dont le combustible gratuit est disponible sur le lieu d'exploitation. L'option des énergies vertes est donc adaptée selon les critères cités ci-haut. Cependant ce choix reste encore difficile, car il dépend non pas seulement de la ressource en elle-même, mais aussi du fait que le rendement n'est toujours pas aussi favorable que voulu. Le caractère aléatoire de certaines énergies renouvelables telles l'éolienne, le solaire, ou la marée rend difficile l'exploitation en autonomie totale de ces ressources vues que la charge n'est souvent pas en phase avec la production. Certaines technologies s'avèrent être matures et adaptées aux régions nordiques, mais la maturité de la technologie n'est pas tout, encore il faut que la ressource soit disponible et exploitable sur le site cible ou à proximité de celui-ci, qui justifierais le choix de ladite technologie par rapport à un autre.

Ce projet a pour objectif d'explorer la logistique entourant l'implantation et l'exploitation des énergies vertes dans un contexte de climat froid et de site isolé; d'identifier les contraintes et les barrières liées au déploiement des énergies vertes en régions isolées nordiques. D'identifier les phénomènes atmosphériques propres au site, de faire le choix de la technologie verte adaptée au contexte du site cible, d'optimiser les moyens logistiques déjà en place en se référant aux autres projets de déploiement des énergies vertes, des projets miniers ou encore de la recherche en régions isolées nordiques.

Dans un premier temps, la démarche à faire serait d'identifier les besoins réels en approvisionnement énergétique. Le GD étant sur place, la logistique autour de son exploitation a déjà été appliquée et nous allons :

1. Rassembler les informations sur l'approvisionnement en carburant incluant les moyens de transport adaptés pour l'accès au site.
2. Estimer le coût de la main-d'œuvre, du personnel qualifié pour la maintenance du GD et des équipements électriques associés.
3. Identifier la logistique d'exploitation du site.

Pour la mise en place de la logistique d'installation de l'énergie verte, on devrait :

4. S'assurer de la disponibilité de la ressource verte par une étude de préfaisabilité
5. S'assurer de l'exploitabilité de la ressource par une étude faisabilité.

Une fois toutes ces démarches complétées, la logistique d'installation sera définie en fonction des besoins, de la localisation du site et des équipements déjà sur place. Dans le cadre de ce projet, la logistique employée devra accompagner toutes les phases du projet, de la conception, à la réalisation ainsi qu'à l'exploitation.

Pour des projets se déroulant en régions éloignées nordiques, pour une bonne logistique de soutien, il convient de :

6. Rassembler toutes les informations sur l'opération des équipements et leur adaptation aux milieux nordiques et isolés.
7. Évaluer les risques qu'induisent les températures basses sur les matériaux, les équipements et le personnel.
8. Optimiser la logistique par la gestion intelligente de toutes les données.

Ce mémoire est présenté en quatre chapitres, dont le premier fait un rappel sur l'alimentation en énergie des sites isolés nordiques, le second présente les limites et la faisabilité en ce qui concerne le déploiement des énergies vertes en milieu nordique et isolé. Le troisième chapitre présente la logistique adaptée en milieu nordique et isolé en se référant aux éléments de base de la logistique, le quatrième chapitre présente deux cas d'exploitation des énergies vertes adaptées en milieu nordique, le cas de l'énergie éolienne et du solaire photovoltaïque et nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

ALIMENTATION EN ÉNERGIE DES RÉGIONS NORDIQUES ET ISOLÉES

1.1 RAPPEL SUR LE RESEAU ELECTRIQUE

L'ensemble constitué d'appareils destinés à la production, au transport, à la distribution ainsi qu'à la consommation de l'énergie électrique est appelé « réseau électrique ».

L'électricité est un élément important du développement économique. Suite à la demande croissante en énergie durant la phase d'industrialisation qu'ont connue les pays développés, il a fallu y répondre efficacement en produisant de grosses quantités d'électricité à partir d'unités de production dites « centrales électriques ». Ces unités de production ou centrales électriques utilisent des sources primaires dont le principe de fonctionnement consiste en un mouvement de rotation d'une turbine par l'énergie de la source primaire (ex. : charbon, eau, uranium, etc.). La turbine entrainera l'alternateur afin de produire de l'électricité. Ce principe de fonctionnement est commun aux grosses structures de production d'énergie électrique.

On peut aussi produire de l'électricité sans passer par un mouvement mécanique au préalable, comme les centrales photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique à l'aide des diodes photosensibles, ou encore les piles à combustible qui utilisent directement l'énergie chimique. Il existe d'autres générateurs thermoélectriques et thermo-ioniques qui produisent de l'électricité à partir de deux matériaux portés à des températures différentes, etc.

Les unités de production sont généralement construites à proximité du lieu d'extraction de la source primaire utilisée, afin d'éviter un coût supplémentaire engendré par le transport de la source primaire du lieu d'extraction à la centrale de production électrique [1]

En général il existe trois types de centrales électriques :

1. Les centrales de base qui sont de grande puissance et débitent leur pleine capacité en tout temps. Elles fournissent la plus grande partie de l'énergie électrique à l'ensemble du réseau.

2. Les centrales intermédiaires qui sont généralement de puissance moyenne peuvent réagir instantanément aux fluctuations de la demande et doivent donc avoir une capacité facile à contrôler.

3. Les centrales de pointe qui sont aussi de puissances moyennes et ne débitent leur pleine capacité que pendant un temps court. Elles sont souvent mises en route pour répondre aux charges de pointe. Elles doivent donc être mises en marche rapidement.

Selon la variation de la charge, l'appel à une unité de production de base est requis en tout temps. Sur une année, le pic de puissance se produit en moyenne 15% du temps, le 70% du temps il y a une fluctuation et le reste des 15% du temps est assuré uniquement que par la puissance de base.

On a donc besoin d'une centrale intermédiaire la majorité de temps, car il se produit toujours une fluctuation de la charge. Les centrales les plus répandues sont les centrales thermiques, hydroélectriques et nucléaires. L'hydroélectricité représente la première source renouvelable exploitée dans le monde. Bien qu'elle soit très répandue et largement exploitée, la production électrique à partir des énergies renouvelables (ENR) reste encore faible malgré les efforts entrepris par certains pays pour faire de la production électrique à base des ENR une partie intégrante du réseau électrique national. Les statistiques mondiales démontrent une forte dépendance aux énergies fossiles avec plus des deux tiers du total de

la production mondiale, soit 68.1% en 2012. Le nucléaire, lui, représente 10.9% et la combustion de déchets qualifiée de non renouvelable, représente 0.2%[2].

1.2 FONCTIONNEMENT D'UN RESEAU ELECTRIQUE

L'équilibre entre la production et la consommation doit être assuré en tout temps afin d'éviter d'éventuels manques d'approvisionnement. L'appel de la puissance varie en fonction de l'heure de la journée ou encore suivant les saisons. Par exemple, en hiver l'appel de puissance peut atteindre le double de l'appel minimal de puissance en été. Dans une journée d'hiver, le maximum de puissance est requis aux environs de 17h quand toutes les lumières des maisons sont allumés et que certaines usines sont encore en activité. Par contre, le creux de la demande lui survient la nuit [1, 3] .

Un réseau électrique peut être connecté à d'autres réseaux formant ainsi un grand réseau interconnecté. L'interconnexion de plusieurs sources individuelles (centrales reliées) vise à répondre aux exigences de fonctionnement d'un réseau électrique qui sont : la stabilité, la continuité du service et l'économie. À titre d'exemple, les centrales R1, R2 et R3 distinctes peuvent alimenter leurs réseaux respectifs. Les fréquences peuvent aussi être différentes. La perturbation sur un réseau n'influe pas sur les autres. Mais une fois interconnectés ils doivent nécessairement fonctionner à la même fréquence.

Les réseaux interconnectés deviennent ainsi un ensemble d'un grand réseau plus fort que le réseau pris de manière autonome, et ce grand réseau supporte mieux les perturbations. Si une surcharge survient sur le réseau R1, le transfert d'énergie se produit automatiquement sur les lignes d'interconnexion. Le surplus de la charge sera donc supporté par les trois centrales.

De même, en cas de panne ou d'entretien sur l'un des réseaux, la charge de celui-ci est supportée par les autres, tout comme on peut répartir la charge sur tous les réseaux interconnectés afin que le coût de fonctionnement global soit minimal. Durant la nuit, au

lieu de faire fonctionner les centrales à 30% de leur capacité, on peut arrêter complètement une centrale et laisser aux autres toute la charge de manière répartie.

Ainsi, on réduit le coût de fonctionnement d'une centrale à zéro et on augmente le rendement des autres qui débiteront une puissance avoisinant leur valeur nominale[1, 3].

1.3 CHOIX DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE POUR LES SITES ISOLEES NORDIQUES

Il existe cependant d'autres réseaux qui sont dits autonomes ou encore isolés. L'éloignement de certains sites d'habitations du réseau central de distribution, l'escarpement du relief ou encore certaines difficultés techniques rendent difficile l'accès au réseau central de distribution par des lignes électriques. Les pertes sur les lignes électriques augmentent avec les kilomètres parcourus étant donné que le transport d'énergie se fait à de très hautes tensions (400KV pour la majorité des réseaux, 750 KV au Canada et même jusqu'à 1 MV en Russie). Il se produit autour de la ligne des décharges dans l'air ambiant, qui entraînent des pertes le long de la ligne. La pollution atmosphérique dépose des particules qui recouvrent les lignes. Ces particules se comportent comme une pointe qui augmente localement le champ électrique et les pertes par effet joule en raison de la résistance interne de la ligne [1].

À une tension donnée, il est possible de réduire les pertes par effet joule en minimisant la résistance de ligne. Pour cela, il faudrait augmenter la section équivalente des conducteurs, le poids, ainsi que le volume de l'ensemble des infrastructures, ce qui n'est pas envisageable sur des longues distances[1].

Dans les pays nordiques, pendant l'hiver, les pylônes doivent supporter un poids supplémentaire avec l'accumulation de la neige sur les lignes. Cela rend difficile le transport de l'énergie par des lignes aériennes dans ce contexte climatique[1].

Toutes ces contraintes techniques ont poussé au choix d'une production décentralisée généralement de moyenne puissance, située à proximité du centre de consommation, minimisant ainsi les pertes sur les lignes de transport.

Le moyen le plus efficace pour s'alimenter dans ce type de réseau est l'utilisation d'un groupe diesel (GD) électrogène dont le faible coût d'achat et la facilité d'exploitation sont des critères qui en ont fait un choix adéquat, outre le fait de disposer d'une unité de production qui ne demande pas la construction de grandes structures.

1.4 SYSTEME HYBRIDE

On définit par système hybride, un système qui utilise plus d'une source d'énergie pour la production de l'électricité. Ce système bénéficie de l'avantage que peut offrir chacune des sources en particulier et de la combinaison de celles-ci. Pour les régions isolées nordiques, la solution d'hybrider plusieurs sources d'énergie permet d'assurer la continuité de service. Les combustibles fossiles utilisés par les GD sont responsables du rejet de gaz à effet de serre (GES), de la pollution du sol et de l'air. Dans la lutte contre le réchauffement climatique causé par ces GES, l'hypothèse la plus plausible serait de s'affranchir complètement de toute source émettrice de GES ; cependant, les besoins en énergie ne cessent d'augmenter et nous sommes encore très dépendants du pétrole. Aussi, l'arrivée des nouveaux pays émergents dans la course au développement n'a fait qu'accroître ces besoins.

La deuxième hypothèse, plus réaliste, serait de réduire la consommation des combustibles fossiles en améliorant certaines technologies gourmandes en combustible, comme l'industrie automobile par exemple qui représente à elle seule près de 60% de la consommation totale du pétrole dans le monde.

La solution pour réduire la consommation du pétrole dans la production électrique est de réduire la fréquence d'utilisation du groupe électrogène par l'hybridation de celui-ci avec

une autre source non polluante afin de réduire les effets sur l'environnement et le coût d'exploitation[4].

En effet, depuis la crise pétrolière de 1973 plusieurs secteurs industriels ont été affectés et cela a démontré la vulnérabilité du secteur économique en général. Pour les sites isolés, il y a eu un impact sur le coût d'exploitation des générateurs diesel utilisés pour s'alimenter[5]. À cet effet, plusieurs systèmes hybrides ont été mis en place telle système éolien-diesel, solaire-diesel, éolien-solaire-diesel, etc. En effet, plusieurs combinaisons sont possibles dépendamment des ressources disponibles sur les lieux d'exploitation.

1.5 SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE

Selon l'association pour l'étude des pics de production du pétrole et du gaz naturel, la consommation du pétrole serait de 3,8 milliards de tonnes tous les trois ans. À ce rythme, les réserves mondiales seront épuisées d'ici une quarantaine d'années selon les hypothèses. On lie souvent le développement économique au taux de production ou de consommation électrique. Cependant il reste un critère à exploiter avec précaution selon l'édition 2013 du quinzième inventaire sur l'énergie mondiale. En effet, la phase d'industrialisation dans le monde a donné à l'électricité une importance capitale dans l'essor de plusieurs secteurs économiques, d'où le lien que l'on fait souvent entre production électrique et niveau économique d'un pays [2].

La répartition de la consommation électrique mondiale selon les régions du globe par habitant et donnée comme suit :

- L'Amérique du Nord : 14167 KWh/hab.
- L'Europe de l'Ouest : 6646 KWh/hab.
- L'Europe Centrale : 4411 KWh/hab.
- L'Asie du Sud et Sud-est : 3400 KWh/hab.

- L'Afrique du Nord : 1771 KWh/hab.
- L'Afrique subsaharienne : 490 KWh/hab.

Au vu de ces chiffres, il existe une disparité selon les régions du monde au niveau de la consommation de l'électricité par habitant. Cependant, cela ne justifie pas le niveau de développement d'un pays. Dans certaines régions du monde, une production plus élevée par tête ne signifie pas nécessairement un niveau de développement élevé. Ces écarts liés au niveau de la consommation d'électricité ne reflètent non pas seulement les disparités au niveau économique, mais tiennent également compte de différences de croissance économique (quantité d'électricité nécessaire pour produire une unité du PIB). La consommation d'électricité par habitant est en hausse dans les pays émergents ou en phase d'industrialisation comme l'Asie de l'Est et Sud-est (+6.6 % en moyenne), suivie de l'Afrique du Nord (+4.7 %), l'Asie du Sud (+4.5 %), et le Moyen-Orient (+3.8%). Par contre cette hausse est modérée dans les pays développés. Ceci s'explique par le fait que la plupart des produits manufacturés viennent de l'extérieur et que dans ces pays des efforts particuliers sont faits en matière de gestion de l'énergie (systèmes moins énergivores). En termes de chiffres, le décalage entre la croissance économique et la production d'énergie dans les pays postindustriels est forte en Amérique du Nord (-1.1 %) en moyenne, en Europe de l'Ouest (-0.5%). L'Afrique subsaharienne quant à elle, connaît un taux de croissance faible par rapport au reste des pays en voie de développement où la moyenne annuelle est de 0.4%. L'Afrique du Sud représente à elle seule 65% de la production subsaharienne [2].

➤ *Production d'électricité d'origine renouvelable*

La production d'électricité de sources renouvelables(ENR) a atteint le un cinquième de la production mondiale avec un taux de pénétration de 20.8% en 2012 (hydroélectricité comprise), soit 4699.2 TWh. Entre 2002 et 2012 la part des ENR dans la production mondiale d'électricité a augmenté de 1739 TWh passant de 2960.1 TWh à 4699.2 TWh, soit une croissance annuelle de 4.7 %. Ce taux est supérieur à la croissance annuelle de

l'utilisation des combustibles fossiles qui est de 3.9% en moyenne par an et du nucléaire à 3.1% par an du fait de la diminution de la production nucléaire entre 2002 et 2012(-197.3 TWh).

Les ENR se sont fait une place au cours des dix dernières années dans la structure mondiale de production d'énergie. Toutefois, même si cette croissance est importante au niveau mondial, il y a cependant une disparité au niveau régional. Elle est fortement en augmentation en Europe de l'Ouest grâce d'une part à l'énergie éolienne, la biomasse et le solaire qui ont atteint plus de 12% en 2012 par rapport au 10.5% en 2011, en Asie du Sud-est grâce à l'hydroélectricité qui aura atteint un record en franchissant le cap de 1000 TWh en 2012 soit 13.4% contre 11.8% en 2011. Pour les autres régions du monde, l'évolution est plus constante.

Cette évolution de la filière ENR peut s'expliquer de deux manières, premièrement la forte augmentation de la production de l'hydroélectricité en Asie et deuxièmement la mondialisation d'autres filières ENR en particulier l'éolien, le solaire et la biomasse[2].

Pendant plusieurs années, l'hydroélectricité était la source renouvelable hors combustible fossile représentant à elle seule le quart de la production mondiale d'électricité. Sur la période de 2002-2012 la production ENR hors hydroélectricité a connu une croissance cinq fois plus rapide, soit une moyenne annuelle de 15.1% contre 3.1% pour l'hydroélectricité. L'analyse filière par filière montre que le solaire affiche un taux de croissance élevé sur la période de 2002-2012 de plus de 50.6%, la filière éolienne vient en deuxième position avec une croissance de 26.1% en moyenne par an, la filière biomasse elle, connaît une croissance plutôt modérée soit 8.3% par an. Cette croissance est restée active avec la fermeture de certaines centrales au charbon transformées en centrales de Co-combustion biomasse. Parmi les sous-filières de la biomasse, on peut citer : la biomasse solide qui a représenté 71.3% de l'électricité biomasse en 2012, et a augmenté en moyenne de 7.9 % par an. Pour le biogaz, la croissance a été plus importante, soit 13.4% par an en moyenne en raison du développement de la bio méthanisation comme moyen de traitement de déchets dans des stations d'épuration, mais aussi la méthanisation de culture énergétique

(maïs). Pour les déchets municipaux solides, la valorisation organique dans des centrales d'incinération a été également croissante sur la même période avec une moyenne de 4.3% par an, mais s'est stabilisée entre 2011-2012 (-0.5%). La biomasse liquide a connu aussi une croissance de 12.7% en dix ans. Il faudrait dire que le biogaz a pour vocation première à être le carburant pour les moteurs de véhicule via le biodiesel et bioéthanol. La géothermie connaît une croissance faible du fait qu'elle reste très localisée.

En termes de perspectives pour la filière des ENR on prévoit une croissance de la production d'électricité renouvelable dont la majeure partie sera produite en Europe, en Amérique du Nord, en Asie où la Chine est déjà le plus grand producteur d'hydroélectricité deviendra dans quelques années le plus grand producteur éolien et solaire[2].

1.6 CONCLUSION

Le présent chapitre fait un rappel sur le réseau électrique et le système hybride en survolant certains aspects conceptuels et techniques liés à l'exploitation d'un système décentralisé (réseau autonome), l'intérêt visé par le développement d'un système hybride que ce soit sur le plan économique, environnemental et technique. Du point de vue énergétique, la situation énergétique mondiale présente des chiffres qui démontrent les inégalités existantes en termes de consommation ou de surconsommation d'énergie pour une prise de conscience afin d'opter pour les technologies moins énergivores, moins polluantes ou encore mettre en place un modèle d'efficacité énergétique afin d'éviter les pertes d'énergie électrique par une meilleure gestion. Tous ces éléments donnent les bases pour une meilleure compréhension du contexte dans lequel le sujet du mémoire sera traité par la suite.

CHAPITRE 2

CLIMAT NORDIQUE ET EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

2.1 CARACTERISTIQUES DU CLIMAT FROID

Les régions à climat froid sont des régions où se manifestent généralement les phénomènes atmosphériques tels les extrêmes basses températures, la neige, le givre, le vent glacial et où les hivers sont longs et caractérisés par la noirceur des journées ; durant les étés par contre les journées sont longues. Cependant, ces phénomènes diffèrent d'une région à une autre avec un certain degré de sévérité dépendant de la localisation et des phénomènes propres à la région. Ces régions se situent à des latitudes moyennes ou hautes et à des hautes altitudes. Comme régions du monde concernées par ces descriptions, on peut citer : l'Antarctique, l'Arctique, l'Alaska, le nord des États-Unis, le Canada, la Scandinavie, l'Asie Centrale, l'Europe Centrale, la Russie, les régions montagneuses dans certaines parties du monde se manifestent également des phénomènes associés aux régions froides comme dans les Andes ou encore dans les Alpes Européennes[6].

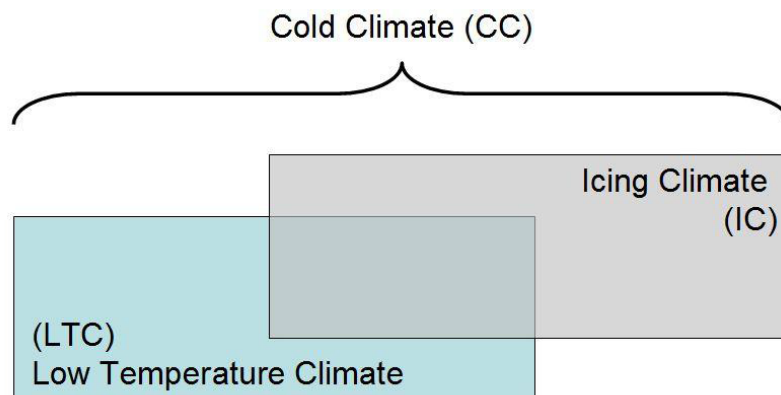


Figure 1: Définition du climat froid

2.2 ÉNERGIES RENOUVELABLES ADAPTEES POUR LE CLIMAT FROID

Pendant longtemps, l'exploitation des énergies fossiles a contribué à l'émergence des pays développés lors de la phase d'industrialisation qu'a connue le monde. Cependant cette exploitation s'est faite au détriment des conséquences que pouvait engendrer une gestion non contrôlée des ressources. Il a fallu moins de trois siècles pour épuiser les ressources que la terre aura mis des millions d'années à former. Malheureusement la prise de conscience n'est pas venue de la réalité de l'exploitation de ces énergies fossiles, mais plutôt de la fragilité du secteur énergétique avec la crise du pétrole de 1973. L'idée de l'après-pétrole sembla à l'époque impossible, mais la fragilité du secteur économique a sonné l'alarme quant à la gestion durable des ressources minérales.

L'exploitation des régions nordiques a pris un certain retard, la difficulté d'accès suite aux conditions climatiques y est pour beaucoup. Néanmoins, les principales activités que connaissaient ces régions de l'extrême nord venaient des autochtones de la région ainsi que certaines équipes de chercheurs ou encore lors de la ruée vers l'or des régions subarctiques.

Bien que n'ayant pas connu une forte activité industrielle durant le siècle passé, malheureusement les conséquences du réchauffement climatique ne sont pas des phénomènes locaux, mais plutôt globaux ce qui entraîne donc les conséquences sur des milieux nordiques. Les ressources renouvelables que possèdent les régions nordiques sont potentiellement exploitables avec des technologies adaptées au climat toujours dans le but de réduire les GES principaux responsables du réchauffement climatique. Dans la conception d'un projet à ENR pour une région nordique, l'exploitation de la ressource renouvelable devra être concurrentielle à la source fossile déjà exploitée, permettre également d'économiser sur l'achat du pétrole et par la même occasion de réduire l'impact environnemental. Dans cette partie nous allons explorer les énergies renouvelables qui répondraient au mieux aux critères d'adaptabilité en régions froides.

À l'exemple de l'Amérique du Nord, principalement du Nord canadien, en 2011 les premiers ministres canadiens du Yukon, du Nunavut, et des Territoires du Nord-Ouest se sont rencontrés pour dresser un portrait sur la situation énergétique de leurs provinces et des conséquences du changement climatique dans ces régions. Un des changements à faire afin de contrer les effets du changement climatique est sur le plan énergétique. Les raisons en sont qu'une grande partie du chauffage et de l'électricité produite dans ces trois provinces sont assurées par des combustibles fossiles importés comme source d'énergie principale, rendant ainsi ces communautés vulnérables aux coûts élevés, aux perturbations de l'approvisionnement et à l'instabilité du prix du baril[7].

Un inventaire des ressources renouvelables actuelles et futures a été fait. Cet inventaire analyse l'état de la consommation actuelle des énergies renouvelables (ENR) dans les trois territoires. Le but était de :

- Analyser la consommation actuelle des ENR dans les trois territoires
- Présenter les mesures en cours et décrire la politique élaborée afin d'accroître l'usage des ENR dans le Nord du Canada.
- Ressortir le contexte géographique et politique propre à chacun des territoires qui définirait les perspectives et défis particuliers au développement des ENR.

Cette démarche des autorités de trois territoires nordiques canadiens vient du fait que selon l'Arctique *Impact Assessment* (2004), aussi longtemps que les émissions de GES dans le monde se maintiendront au rythme actuel, la tendance au réchauffement climatique s'accroîtra.

Dans plusieurs collectivités nordiques les températures moyennes ont augmenté de 2 à 3°C au cours de cinquante dernières années, la fonte du pergélisol et l'état changeant de la glace menace les fondations des infrastructures et rendent les systèmes de transport par route de glaces moins fiables. La réduction des émissions de GES exige des efforts à

l'échelle mondiale. Des mesures devront être prises afin de contrôler les émissions de GES à l'échelle locale[7].

2.2.1 Sources d'énergie actuelles

L'alimentation en énergie varie selon le territoire. Dans le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest, l'hydroélectricité est une source importante depuis de décennies. Le chauffage dans ces deux territoires est assuré par des produits pétroliers, bien que le bois ait été une source importante de chauffage domestique dans ces deux territoires. Le gaz naturel est également utilisé dans deux collectivités des Territoires du Nord-Ouest pour le chauffage et l'électricité. Les génératrices diesel quant à elles répondent aux besoins énergétiques dans les trois territoires et constituent la source principale d'énergie au Nunavut[7].

2.2.2 Analyses de sources renouvelables

1. L'hydroélectricité

La production d'électricité par centrale hydroélectrique remonte aux années 1940, dans le Yukon et dans les Territoires du Nord-Ouest. Les projets hydroélectriques ont été mis en place grâce aux investissements importants du gouvernement fédéral qui coïncidaient avec l'ouverture d'une mine et par la même occasion un client potentiel pour financer le projet. Le potentiel hydroélectrique est important, actuellement non développé, et pourtant prometteur pour le Nord Canadien.

Cependant, les projets d'hydroélectriques sont dans la plupart confrontés à des nombreux défis tels :

- Le coût
- Le manque des capitaux
- Le besoin d'une clientèle assurée

- Les impacts socio-économiques et environnementaux

Ceci s'explique par le fait que la construction d'une centrale hydroélectrique demande des capitaux que les gouvernements doivent financer tout en maintenant le tarif des clients. D'autres difficultés sont d'ordre social. Sur certains cours d'eau, la construction des centrales suscite des inquiétudes au sein des collectivités locales, aussi les difficultés logistiques suite à l'éloignement des consommateurs de principaux sites à potentiel hydroélectrique sont en général les points qui freinent le développement de l'hydroélectricité en région nordique canadien[7].

2. Le solaire

- **Le solaire photovoltaïque**

Il est vrai que les situations géographiques des régions froides visées ne sont pas propices au développement du solaire. Cependant, elles ont une particularité qui avantage le fonctionnement de panneau photovoltaïque. Les cellules photovoltaïque sont une faible résistance, elles fonctionnent très bien à des températures en dessous de zéro, de plus la réflexion de la lumière sur la neige augmente l'intensité solaire ce qui fait qu'en région froide les cellules photovoltaïques (PV) donnent des meilleurs résultats que ce qu'indique leur capacité nominale. Le problème lié à l'exploitation de cellule PV en région nordique est la disponibilité saisonnière du soleil. En effet ces régions sont caractérisées par des hivers longs et sombres tandis que les étés sont courts et ensoleillés or c'est en hiver que la demande en énergie atteint souvent son pic. La contribution solaire à ce moment-là ne consistera qu'à la diversification des sources d'approvisionnements surtout lorsqu'elle est associée à un système de stockage par batterie ou d'autres systèmes adaptés afin de compenser l'usage du diesel.

L'énergie solaire PV reste cependant plus chère à produire par KWh que l'hydroélectricité ou le diesel. Le solaire est une technologie d'avenir à cause de sa simplicité et de la disponibilité sur la surface du globe. Les prix ont chuté durant les dernières années rendant ainsi la technologie accessible à faible coût, ce qui la rend aussi

concurrentielle par rapport aux autres technologies. À mesure que la demande mondiale augmente, les prix continueront à baisser aussi la recherche dans le domaine tend à rendre les cellules de plus en plus performantes accentuant ainsi l'attraction des principaux promoteurs des énergies vertes[7].

- **Le chauffage solaire**

Le chauffage solaire consiste à chauffer de l'air et de l'eau par l'énergie solaire. Cette technologie est simple et fiable. Des systèmes à base d'eau captent la chaleur du soleil dans des absorbeurs fermés et, à l'aide d'un échangeur, transfèrent cette énergie à un réservoir d'eau chaude auxiliaire où elle est stockée. Cette eau chaude servira au chauffage des locaux, comme eau domestique préchauffée ou encore elle peut chauffer directement l'air. Le système de chauffage solaire peut contribuer à économiser plus de 50 % des coûts annuels de chauffage et d'eau chaude en réduisant de façon significative les grandes quantités d'électricités produites par un combustible fossile. Cette forme d'énergie n'est disponible qu'au printemps et en été, saisons où le rayonnement solaire est plus intense[7].

3. L'énergie éolienne

Grâce à leur situation géographique, les régions nordiques sont reconnues pour un bon potentiel éolien en termes de vitesse du vent et de la densité de l'air qui est plus élevée en région froide augmentant ainsi la puissance captée par la turbine éolienne. Les conditions climatiques imposent des défis techniques aux turbines fonctionnant dans ce milieu. Une mauvaise planification dans la mise en place du projet, la surestimation du potentiel éolien ou encore la sous-estimation des conditions climatiques peuvent engendrer des coûts élevés pour l'exploitation des turbines éoliennes dans le climat nordique[7].

Afin de réduire les coûts il faut :

- Implanter le parc éolien proche du lieu de consommation (habitation, collectivité, camp, mines, etc.)
- Former les personnels locaux opérateurs et personnels d'entretien.

- Choisir une technologie adaptée aux climats froids

4. La biomasse

Le bois a toujours été une énergie indispensable pour les ménages. En région nordique canadienne la quantité d'énergie calorifique produite par année à l'aide de poêle à bois est en moyenne 65000 MWh dans les Territoires du N-O, de 11000 MWh au Yukon. Le Nunavut étant situé dans la limite forestière n'a donc pas de forêt. Certains résidus de bois d'emballage et de construction provenant des sites d'enfouissement y sont acheminés et utilisés pour le chauffage. La biomasse comme source d'énergie dans le nord contribue à la réduction de GES, car la combustion du bois contribue au cycle naturel du carbone, c.-à-d. lors de la combustion du bois la quantité de carbone rejetée dans l'atmosphère est la même que celle absorbée par la plante pendant sa croissance. Ainsi la combustion du bois n'augmente en rien la quantité de carbone dans l'atmosphère.

À grande échelle, l'usage de la biomasse tels les granules de bois pourrait, à l'aide de grandes chaudières, alimenter en chauffage les bâtiments et les écoles. Ces chaudières peuvent aussi produire de l'électricité comme des centrales de cogénération. Reste à améliorer le système de transport de granules. Dans ce domaine le manque d'un développement adéquat augmente le prix du transport et peut occasionner de possible interruption dans la chaîne d'approvisionnement.

Une mise en place de la gestion forestière est importante afin répondre au concept de développement durable auquel toute exploitation à énergie renouvelable aspire. Le bois se présente comme un candidat idéal pour la réduction de rejet de GES avec une diminution de l'usage des combustibles fossiles destinés au chauffage et à l'électricité en remplacement du mazout et du propane qui sont les plus utilisés actuellement, en plus du radiateur électrique fourni par le surplus de l'hydroélectricité. En combinant ces deux systèmes de chauffage on pourrait éliminer complètement le combustible fossile.

Au Yukon, le développement de la biomasse permettrait d'alimenter un bâtiment situé trop loin du réseau de distribution électrique local à un coût moindre sur le plan économique et environnemental que le mazout domestique présentement utilisé.

Au Nunavut la perspective de l'utilisation du biocarburant issu de l'industrie de la pêche est très envisageable[7].

5. La géothermie

La géothermie est la chaleur provenant du sol. À mesure que l'on creuse profondément cette chaleur augmente. Les températures froides du pergélisol font que l'usage de cette forme d'énergie est présentement restreint. Cependant il existe un potentiel géothermique dans les anciennes mines d'or sous Yellowknife. Ces puits et tunnels se remplissent d'eau, la température atteignant les 50°C, ce qui pourrait fournir un réservoir thermique pour une installation centralisée desservant des immeubles. Ce projet pourrait produire une puissance jusqu'à 20 MW de puissance calorifique.

Dans les Territoires du N-O, une carte du potentiel géothermique a été récemment réalisée indiquant une possibilité de trouver des températures propices à la production de la chaleur et de l'électricité sur deux à trois kilomètres sur une zone s'étendant entre Fort Simpson et Hay River. Le projet pilote de 1MW à Fort Lair est un exemple de potentiel géothermique dans les Territoires N-O. Des forages pour le gaz naturel dans cette région ont permis de découvrir de l'eau chaude à 130°C. Au Yukon on estime le potentiel géothermique de 500 à 1500 MW pouvant servir à produire de l'électricité. Au Nunavut aucune étude n'a été faite sur le potentiel géothermique, bien qu'on ait identifié des points chauds près de la surface du sol dont on pourrait utiliser le potentiel[7].

6. Énergie des courants océaniques et énergie marémotrices

L'amplitude des marées constitue une source d'énergie qui pourrait être utilisée. Il existe deux systèmes de production utilisant l'énergie de marée :

- Le système avec réservoir d'eau où le réservoir est rempli lors de la marée montante. Quand l'eau se retire, le réservoir d'eau s'écoule tout comme fonctionnerait une centrale hydroélectrique.
- Le système immergé qui lui produit de l'énergie à partir des courants des marées.

Il faut un minimum de 5 mètres d'amplitude pour que le système à réservoir d'eau soit efficace. Il n'existe que quelques endroits dans le monde où ce type de marée existe et la région Baffin Sud au Nunavut est l'une d'elles. Le potentiel de production d'énergie marémotrice au Nunavut est estimé à 30.000 MW à 34 endroits. Dans les territoires du N-O on pourrait produire 35 MW à 4 endroits. Cependant les conditions climatiques posent un réel défi à la mise en place de cette technologie, ajouté à cela l'éloignement des potentiels sites de production. Ceci n'avantage pas le développement de la technologie[7].

2.3 ANALYSES DE BARRIERES LIEES AU DEPLOIEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN CLIMAT FROID

Le déploiement des énergies renouvelables en climat froid reste encore difficile, suite aux contraintes causées par le climat, l'éloignement, l'inaccessibilité et même la disponibilité de la ressource renouvelable elle-même. Cette section propose une liste des barrières que doivent relever les projets des ENR en climat froid, regroupées en catégories que nous pouvons citer :

- **Du point de vue économique :**

Les conditions climatiques dans ces régions ont tendance à rendre certains projets plus coûteux qu'ailleurs sur la planète, du fait déjà de l'éloignement et des conditions extrêmes de réalisation. La mise en place d'un nouveau projet destiné à remplacer celui déjà en place ou à l'alléger s'avère assez difficile suite aux aptitudes acquises depuis le temps. L'exploitation du diesel est ancrée dans les habitudes avec elle, la capacité de gérer les situations critiques liées au diesel. Cependant, les changements des modes d'alimentation eux, viennent avec une nouvelle façon de faire dans la gestion de l'énergie. Une autre raison est le coût d'investissement élevé que nécessitent généralement les projets dans ces régions. Pour un projet d'exploitation d'ENR, on doit considérer plusieurs paramètres dont : (1) la disponibilité de la ressource exploitable. (2) La technologie à mettre en place pour assurer la viabilité du projet en terme d'exploitation de la ressource renouvelable sur un long terme. (3) Le coût de cette technologie par rapport à l'énergie conventionnelle fournie par le groupe diesel. (4) Pour être concurrentiel il est primordial que le projet à ENR à remplacer le diesel revienne nettement inférieur du point de vue économique au diesel exploité dans ces régions.

Une des choses à savoir est que les économies faites par les ENR s'étalent sur plusieurs années en présentant les avantages de cette exploitation en termes des coûts d'abord ainsi que le gain du point de vue environnemental.

Les GD alimentant les régions isolées nordiques sont une technologie maîtrisée et ne nécessitant que très peu d'entretien. Cependant les coûts engendrés par l'exploitation de ceux-ci peuvent être jusqu'à 10 fois plus chers que ceux des réseaux connectés. Par exemple au Nunavut, ou encore au Québec, on estime qu'ils reviendraient à 7 fois plus élevés que le prix de production dans les réseaux connectés. L'uniformisation du prix du Kilowattheure sur tout le territoire québécois engendrerait près de 130 millions de dollars de déficit à la société étatique Hydro-Québec chaque année. Au Nunavut l'achat et le transport du diesel sont coûteux, le coût du kilowattheure pouvant varier de 52.39 centimes par KWh à 102.71 centimes, alors qu'en Ontario il est seulement de 11 centimes. Le

gouvernement du Nunavut consacre près de 20 pour cent de son budget annuel en énergie. Un autre fait à considérer est la fluctuation du prix du baril qui fait du coût d'exploitation une variable non constante en permanence[8], [9]. L'absence des programmes de financement des autorités politiques, des acteurs économiques locaux ou encore des promoteurs en énergies renouvelables pour ces régions spécifiques pose certaines difficultés au déploiement des ENR

- **Du point de vue environnemental**

Le projet à ENR en climat nordique subit les contraintes du climat sur toutes les phases du développement du projet. Les hivers longs et les étés courts affectent les phases de construction du projet. Les projets sont souvent arrêtés en hiver, les étés courts ne permettent pas toujours d'accomplir toutes les tâches qui seront poursuivies jusqu'à l'automne ou au printemps prochain.

Pour les ouvriers, le travail à l'extérieur est très difficile. Certains matériaux doivent être manipulés ou conservés sous certaines conditions. Le dégel du pergélisol suite aux changements climatiques pose un réel défi technologique, car pendant très longtemps les technologies développées étaient pour un sol gelé, mais stable. Cependant le dégel du sol pose un problème de stabilité pour les structures déjà en place.

Pour le cas des éoliennes le sol en dégel affecte la fondation de la turbine et la formation du givre qui se produit souvent en altitude peut demeurer durant plusieurs semaines sur les structures.

Pour l'hydrologie, le pergélisol joue un rôle important en surface et en souterrain, pouvant ainsi affecter les régimes des eaux pour les centrales hydroélectriques. Le givre affecte le fonctionnement des éoliennes et des cellules photovoltaïques en réduisant leur efficacité, voir même causer des bris. La noirceur pendant la longue période d'hiver réduit considérablement le temps de fonctionnement de la cellule PV. Pendant l'hiver le niveau des rivières est bas, ce qui pose un problème pour la microcentrale hydroélectrique qui nécessite un niveau élevé des rivières en tout temps. La construction d'un réservoir dans

ces conditions climatiques est à proscrire, car le coût d'investissement serait trop élevé pour un territoire peu peuplé. Une étude sur l'évolution de la glace est requise pour la microcentrale hydroélectrique afin d'éviter le débordement ou les bris des installations. La présence de la neige ou de la glace peut limiter le fonctionnement des ouvrages des barrages électriques[10].

- **Du point de vue logistique**

La question logistique est primordiale pour tout projet d'implantation en région froide et isolée, vu les réalités environnementales et l'éloignement de ces régions des grandes agglomérations. Pour un projet de développement des ENR, la réussite de celui-ci dépend d'une part de la disponibilité de la ressource et d'autre part de la logistique à mettre en place. Pour la logistique, les éléments à considérer concernent tout d'abord le site d'implantation : (1) définir les besoins réels du site, (2) la disponibilité de certains éléments sur le site ou proche du site (personnel qualifié, matériaux, etc.). Ensuite (3) la situation géographique : les zones à couvrir sont généralement vastes, les communautés sont éloignées les unes des autres, ce qui pose un réel défi pour le gestionnaire de projet. (4) L'accessibilité : l'absence d'un réseau routier fiable rend difficile l'accès à certains sites par route, le transport aérien est coûteux et dépend de la météo, le transport par voie maritime est difficile en hiver lors du gel des eaux. L'usage de brise-glace est nécessaire en ce moment-là et devient très coûteux. Durant les mois de l'année où l'accès au site par voie maritime est possible tous les matériaux doivent donc être acheminés[10].

2.4 EXEMPLE D'EXPLOITATION DES ENERGIES RENOUVELABLES EN REGION NORDIQUE : CAS DE LA MINE DIAVIK ET RAGLAN, EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Ces deux projets ont été développés dans le cadre du déploiement et de l'exploitation de l'énergie éolienne comme une énergie alternative au diesel déjà surplace. Nous allons explorer la démarche faite pour ces deux projets y relevant les points communs ainsi que la particularité de chaque projet en fonction des phénomènes atmosphériques propres à chaque site.

2.4.1 Projet éolien de la mine Diavik

1. Présentation de la mine

La mine Diavik est une mine d'exploitation diamantifère, située sur l'île du Lac de Gras. Elle est la propriété de deux partenaires miniers Dominion Diamond corporation et de Rio Tinto, dont les parts sont de 40 et 60 % respectivement. En plus d'être propriétaire, Rio Tinto est également l'exploitant de la mine. Elle est accessible durant deux mois par an par les routes du lac gelé en hiver[11, 12].

La mine est située :

- À 300 km au Nord-est de Yellowknife.
- À 100 km au nord de la limite d'arbres (treelines), limite au-dessus de laquelle, les arbres n'atteignent pas une hauteur dépassant les 5 m.
- À 350 km au sud de l'océan arctique.

La construction de la mine commença en 2000 et prit fin en 2002, la production débuta en 2003. C'est une mine souterraine qui exploite trois cheminées de kimberlite. Un quatrième est actuellement en développement pour un coût de 350 millions de dollars. La

production est prévue pour 2018. L'effectif moyen de la mine est de 950 employés. L'accord pour la construction de la mine a été signé avec 5 groupes d'amérindiens[11].

2. Contexte de développement du projet éolien du site minier

L'éloignement du site du réseau central de distribution a été un obstacle pour permettre le raccordement au réseau principal, car les coûts auraient été exorbitants. Cependant, la consommation de l'énergie dans l'industrie minière est un des facteurs dont dépend l'exploitation à ne pas négliger, car dans certains cas elle représente près du quart du budget total. Le site Diavik dépend entièrement de la centrale thermique au fioul (diesel) exploitée en réseau autonome avec une capacité de stockage du diesel de 80 millions de litres [11].

La chaîne d'approvisionnement elle, commence en Alberta, le coût estimé de l'énergie est de plus de 25% du coût total d'opération. Le coût du litre de diesel dans la mine reviendrait à 1.31\$/ L pour un tarif supérieur à 0.31\$/ KWh[12] .

Les routes de glace accessibles durant les huit semaines équivalent à plus de 70 millions de litres de diesel réapprovisionnés avec 2000 charges par route d'hiver chaque saison. Les risques de déversement sont importants lors de l'acheminement du diesel au site. L'utilisation d'une telle quantité de diesel contribue fortement à l'émission de GES, à la pollution de l'air, du sol et au réchauffement climatique qui a comme conséquence la fonte des glaciers à cause de l'air plus chaud dans les parties de l'extrême nord. Ceci pose également un réel problème pour la route de glace accessible en hiver qui est de moins en moins gelée et, ceci, pour des plus courtes périodes de temps[12].

3. Autre option énergétique

Outre les effets de l'exploitation du diesel sur l'environnement, la fluctuation du prix du baril fait que le coût de l'énergie est variable. La solution pour remédier à ces deux préoccupations dans le cadre d'une exploitation hors réseau de l'énergie fossile est l'usage d'une énergie propre ou encore moins polluante dans la famille des énergies renouvelables avec combustibles gratuits. Parmi les ENR celles adaptées pour des conditions nordiques extrêmes sont peu nombreuses. Cependant pour le projet de la mine Diavik, l'analyse aurait retenu trois sources d'énergie, le solaire photovoltaïque, la géothermie, et l'éolienne[12],[11].

Après analyse il a été conclu ceci :

- Pour l'énergie photovoltaïque : les hivers généralement longs sur le site et la noirceur pendant l'hiver ne permettent pas une forte pénétration de l'énergie solaire. Ainsi, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque après analyse aurait conclu à une valeur actuelle nette négative.
- Pour la géothermie : le faible différentiel de température ne permet pas une exploitation viable de la géothermie pour les besoins à combler de la mine.
- Pour l'énergie éolienne : avec un taux de pénétration élevé de la source éolienne, elle représente la source renouvelable d'exploitation pour les besoins du site après analyse. En termes d'investissement la valeur actuelle nette est positive.

4. Le réseau électrique de la mine

Le réseau électrique de base de la mine est composé de deux centrales électriques au fioul[12].

- PH1 : 5x4.4 MW générateurs CAT
- PH2 : 4x4.4 MW, 2x3.6 MW générateurs CAT

- Un réseau de 13.8 KV avec une bonne qualité de service (QOS)
- La gestion du réseau est faite manuellement
- La chaleur produite par le groupe électrogène est récupérée et ensuite reliée à un système antigel au glycol.
- La charge du système est de 22-28 MW
- Le système de mise à la terre est fait par l'intermédiaire d'une résistance qui offre plus d'avantages pour des réseaux à application industrielle.

5. Déroulement du projet éolien

La campagne de mesure des vitesses de vent menée de 2008-2010 a conclu à un potentiel éolien exploitable avec un taux de pénétration élevé. Du point de vue administratif, en mai 2011 l'approbation de Capex pour Rio Tinto, en juin 2011 approbation avec les communautés locales autochtones NR Can, NAVCan, AANDC et EC. En juillet 2011 le contrat avec le fabricant allemand d'éoliennes Enercon a été signé [12].

5.1. Description de la centrale éolienne

La centrale éolienne est composée de quatre éoliennes Enercon E-700 de 2.3MW. La centrale devra combler 10 % de la consommation du diesel soit plus de 8.3 millions par an, près de 6 % des GES en moins soit 12.000 tonnes de CO₂. Les pales sont munies d'un système de dégivrage, la turbine est à entraînement direct sans boîte de vitesse afin d'éviter le gel de lubrifiant lors d'extrême chute de température. La centrale fournira 17 Gigawatts des ENR par an. Le système de contrôle de la turbine est hors Enercon, une première pour la société Enercon de transférer des données en dehors de son système propre Enercon Scada-DeltaV[12].

5.2. Installation de la centrale éolienne[12]

- Étude du site : préparation du terrain, forage géotechnique de carotte et micro installation en juillet 2014.
- Excavation et dynamitage, construction des routes, fondation et installation de grue de stabilisation de conception PAC du mois d'août à novembre 2011.
- Route de glace pour acheminement sur le site de février à mars.
- Coulage de la fondation avril 2012.
- Levage de la tour, de la nacelle et des pales de juillet à août 2012.
- Installation et production électrique d'août à septembre 2012
- Les lignes connectées au réseau sont chauffées directement.
- Mise en service : de septembre à octobre
- Opérationnelle : fin septembre 2012

5.3. Résultats après la mise en service

➤ 2013 premières années de production [12]

L'année 2013 a connu un des hivers le plus froids durant les 30 dernières années, les chutes de température ont eu des conséquences sur les fonctionnements de la turbine.

- Sur les des pales : dès le départ les chauffages de pales ont été mal installés
- Sur l'instrument de mesure les bris sur les anémomètres ont conduit à l'arrêt de la turbine.
- Sur les convertisseurs : les bris électroniques ont stoppé le fonctionnement des convertisseurs.

- Le support venant d'Enercon sans le système de contrôle SCADA était difficile.

➤ **2013 Solutions pour le parc éolien[12]**

- L'installation de 600V de chauffage pour le système électronique et pour les dépannages.
- Un GD externe pour fournir le chauffage à la turbine.
- Remplacer les systèmes électroniques (anémomètre et convertisseur)
- Le support d'Enercon difficile sans le SCADA.

➤ **2013 Changements du parc éolien[12]**

- Enercon a remplacé tous les composants chauffants de la pale.
- Le lubrifiant a été remplacé par un lubrifiant adapté pour le climat froid.
- Une nouvelle programmation pour les turbines a été installée.
- Le système SCADA delta-V de Enercon a été installé et le support venant de Enercon s'est amélioré.

➤ **2013-2014 productions électriques[12]**

- Les projections étaient de produire 17 gigawatts pour 2013 et 2014 avec une moyenne de pénétration de 10 %.
- À la fin 2013 on atteint une production de 15.9 gigawatts et une pénétration moyenne de 9.2%.
- À la fin 2014 la production a atteint 19.9 gigawatt-heures, 17%, plus que les prévisions escomptés, avec une pénétration de 10.5%[12]

5.4. Comparaison du modèle réel et du modèle d'Enercon

- Rendement en Kilowattheures

33.927 MWh pour le modèle réel contre 33.716 MWh du budget prévu cumulé jusqu'à ce jour[12].

- Facteur de capacité

21-25 % pour le modèle réel et de 21-27% modèle d'Enercon[12].

- Taux de pénétration

Les turbines ont été conçues pour une pénétration moyenne de 25 %, cependant les turbines ont atteint plus de 50 %[12].

- Contribution éolienne pour la réduction de la consommation Diesel

La centrale devait combler le 10 % de la consommation du fioul, elle atteint un pourcentage de 8-11 %[12].

6. Économie du projet

Le projet a été réalisé pour le capital de Diavik et Rio Tinto, le budget alloué était de 33 millions, les dépenses actuelles équivalent 31 millions dollars. Avec une valeur actuelle nette positive le retour sur investissement reviendrait en moins de huit ans[12].

7. L'apport du projet pour les communautés nordiques et pour l'Environnement

➤ Pour les communautés nordiques

La participation des communautés dès le début du projet fut d'un grand intérêt afin de démontrer aux communautés l'apport du projet qui affecterait leur milieu de vie. Ainsi l'engagement social joue un rôle important pour la suite du projet en évitant ainsi certains conflits qui auraient pu porter préjudice au projet. La mine a fait don de la tour

météorologique à Det'on Cho géant mondial sur l'étude de faisabilité éolienne pour les mines. Le projet dans sa globalité aura démontré l'efficacité éolienne en milieu nordique, aussi les installations ont prouvé qu'elles étaient faites pour toutes les saisons[11].

➤ ***Pour l'environnement***

Le projet a tenu compte de l'impact environnemental sur l'habitat humain, de la faune, de la flore, etc. Il y a donc eu une enquête sur le taux de mortalité des oiseaux. L'empreinte sur le sol de tous les équipements (grue, appareil pour le forage géotechnique) a été minimisée. Une étude archéologique a été faite pour éviter d'empiéter sur le site sacré des communautés locales afin d'éviter tout conflit territorial qui pourrait être un obstacle au projet[12].

8. Conclusion

Le projet dans son ensemble fut un franc succès vu les conditions d'exploitation, ayant pris connaissance dès le départ de certains matériaux adaptés aux conditions hivernales certains bris auraient pu être évités. Cependant, le temps est souvent imprévisible le risque zéro n'existant pas. La première année était l'année d'apprentissage, de mise au point afin d'adapter les fonctionnalités des turbines éoliennes aux conditions climatiques auxquelles elles seraient exposées.

2.4.2Projet éolien de la mine Raglan

1. Présentation de la mine et contexte du projet

La mine Raglan est située à 1800 km au nord de Montréal dans la péninsule d'Ungava(Nunavut) où est exploité le nickel, possédant son propre réseau électrique étant donné que la situation géographique de la mine dans le Grand Nord québécois rendait impossible un raccordement.

La mine fonctionne en autonomie totale comme réseau isolé exploitant une centrale au fioul, la part de l'approvisionnement en énergie électrique est élevée, soumis au coût

qu'incombe l'exploitation d'une centrale au fioul (transport du combustible, risque de déversement, l'impact sur l'environnement, etc.). La mine aurait émis de 2007 à 2010 entre 125 et 165 kilotonnes de gaz à effet de serre par année, ce qui dépasse le seuil de 25 kilotonnes fixé par le Québec. La mine sera donc assujettie à la réglementation du marché du carbone. À cette allure, la mine devra acheter des crédits carbones qui pourront s'élever jusqu'à 25 millions de dollars d'ici 2020.

Ce qui pollue plus dans la mine ce n'est tant pas l'activité d'extraction en elle-même, mais l'électricité ainsi que les installations connexes indispensables pour le fonctionnement de la mine (bureau, hébergement, usine de traitement des eaux usées) [13].

Outre l'aspect environnemental, en termes d'économie l'énergie représente le deuxième coût le plus important de la mine. La mine consomme entre 50 et 70 millions de carburant chaque année, ajoutée à cela le coût du combustible très fluctuant qui a triplé durant les dix dernières années [14], [15].

L'exploitation de la centrale au fioul dépend fortement du prix du baril, ce qui rend le coût d'énergie un budget très variant (cf. mine Diavik). Le combustible acheminé de l'extérieur par voie maritime augmente significativement le budget énergie de la mine.

2. Solution alternative

Le site est situé sur un terrain venteux, l'option éolienne était un choix évident. Ainsi, en 2009 la mine lança une étude sur les énergies alternatives au diesel après une étude de référence en Alaska, en Suisse et en Scandinavie sur le rendement éolien en milieu nordique. De 2010 à 2013 les mesures du vent ont été effectuées et les résultats ont été concluants, le potentiel éolien du site étant de classe 1. L'étude de faisabilité comportait aussi une étude d'impact sur la faune et l'acceptabilité sociale. Glencore a retenu comme projet pilote une éolienne de 3MW adaptée au climat nordique[16], [14].

3. Contraintes

➤ Les conditions climatiques

Dans le nord du Québec où est située la mine, l'hiver dure 11 mois, l'été un mois (juillet). L'échéancier était donc serré. Le projet ne disposait que d'un mois. Outre le climat, l'accès à la mine était un autre problème. Toutes les pièces ont été acheminées par bateau, une gestion interne du projet était de mise.

➤ Les financements.

L'industrie minière est très volatile, les mines ont tendance à être réticentes pour investir dans un projet à énergie renouvelable à cause du coût élevé qu'induit souvent un tel projet. TUGLIQ énergie qui est une entreprise qui se spécialise dans l'approvisionnement énergétique de proximité a pour mission de diversifier les sources d'énergie dans le Grand Nord, et est aussi partenaire du projet. TUGLIQ énergie a su trouver du financement de l'aide gouvernementale dont la mine pourrait être bénéficiaire. Le gouvernement du Canada a donné 700.000 dollars d'aide, et le gouvernement du Québec a donné une subvention de 6.5 millions de dollars dans le cadre du programme techno climat et Eco performance dont les 3.5 millions étaient pour ce dernier. Il s'agit de la première subvention accordée par le gouvernement du Québec en rapport avec le plan Nord [14], [17],[15], [18].

4. Objectif du projet

L'installation et l'exploitation d'un réseau intelligent éolienne-hydrogène dans une mine nordique éloignée, afin d'établir une nouvelle technologie de pointe de production et de stockage d'énergie renouvelable à haute pénétration dans un endroit éloigné.

Ce système servira à démontrer le bénéfice d'un tel choix pour la réduction du coût de l'énergie et de la consommation du carburant à comparer à un système diesel seul ou une autre configuration éolien-diesel [10].

5. Technologie retenue

La mine a retenu une éolienne industrielle de 3MW comme projet pilote fabriquée par la société allemande Enercon pionnier dans l'industrie éolienne dans la fabrication des turbines pour le climat froid. Cette turbine de 3 MW sera couplée avec un générateur diesel de 1.8 MW présent sur le site, afin de remédier à la nature variable du vent et du fait que la production éolienne n'est souvent pas en phase avec la demande en énergie, un système de stockage est indispensable pour ce système décentralisé. Trois technologies de pointe ont été retenues pour le stockage du surplus d'énergie produite par la turbine :

- Le volant d'inertie
- La batterie électrochimique (Li-ion)
- Un réservoir à haute pression doté d'un électrolyseur et de pile à combustible

L'éolienne seule a une pénétration de 15 à 20 %. Avec le stockage, ce taux peut atteindre les 35 à 55%. L'éolienne choisie est à entraînement direct sans boîte de vitesse, ce qui élimine les huiles et les engrenages qui ont tendance à geler par grand froid. Les pales sont équipées de chaufferettes pour empêcher le givre de s'accumuler. Ce système de dégivrage est connu pour être assez énergivore, mais très bien adapté pour le climat froid. Munies d'un réglage individuel, les pales peuvent continuer de tourner même en cas de blizzard, en réduisant la vitesse de rotation afin d'éviter une forte contrainte mécanique, tout en profitant au maximum de la puissance éolienne disponible.

Quant au froid l'éolienne est conçue pour des températures basses jusqu'à -40 °c, si le mercure descend en dessous l'éolienne s'arrête. C'est un système de sécurité pour la turbine une fois que la température remonte aux alentours de -35 °c l'éolienne redémarre [17], [16], [14].

Une autre innovation technologique s'est fait au niveau de la fondation de la tour. Le sol de la mine est composé de pergélisol jusqu'à 600m de profondeur. Ces lentilles de glace peuvent fondre en été et faire basculer la structure. Les ingénieurs ont trouvé une solution

innovatrice adaptée au pergélisol. La structure de la turbine est déposée sur une plateforme surélevée reposant sur douze pieux traversant le pergélisol jusqu'à la roche mère. C'est la première éolienne au Québec qui ne touche pas le sol[17].

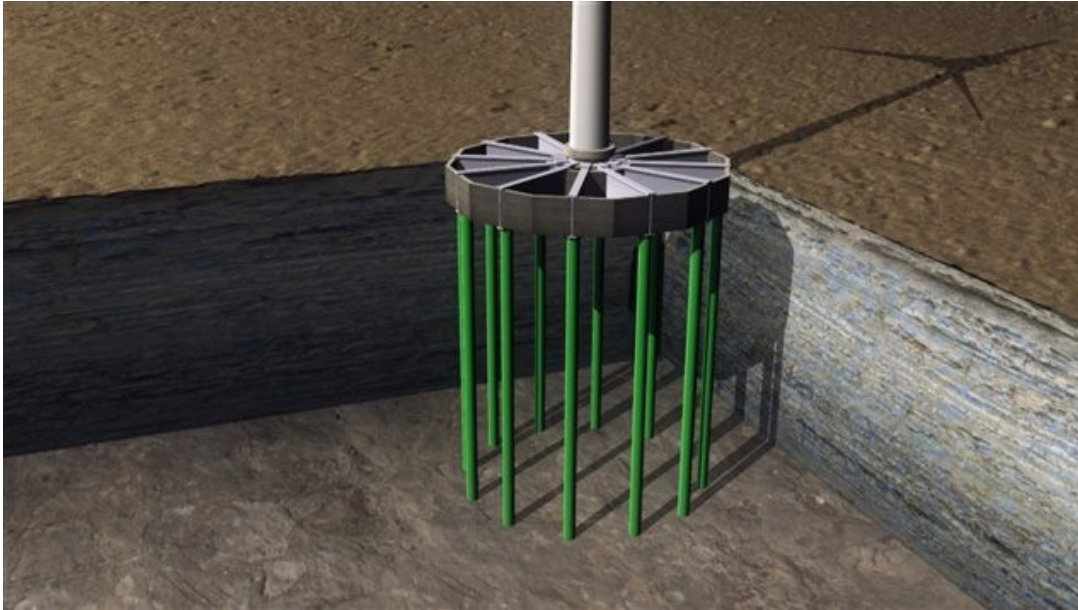


Figure 2: Plateforme de la structure

L'hydrogène produit par électrolyse de la molécule d'eau sera utilisé comme carburant pour le véhicule de la mine en remplacement au diesel [16]. L'été ne durant qu'un mois, le temps requis pour implanter l'éolienne était très court. La mine disposait de trois jours pour monter toute la structure. Passé ce délai le vent allait reprendre de la vigueur. Il a fallu près d'une année pour compléter l'installation, les pales ont été installées dans la nuit alors que le vent soufflait fort. L'éolienne s'est mise à tourner en début septembre 2014. Après un mois de fonctionnement de la turbine, la mine aurait économisé près de 200.000 litres de diesel, soit 550 tonnes de gaz à effet de serre en moins. La turbine de 3MW devra remplacer 5% de la consommation totale du diesel de la mine, soit 2.4 millions de litres, ce qui correspond à 2400 véhicules de moins sur les routes du Québec.

En 7 mois 2600 tonnes de gaz à effet de serre ont été réduites, la turbine devra aussi alimenter le village Inuit de 600 habitants[19], [16], [17],[14].

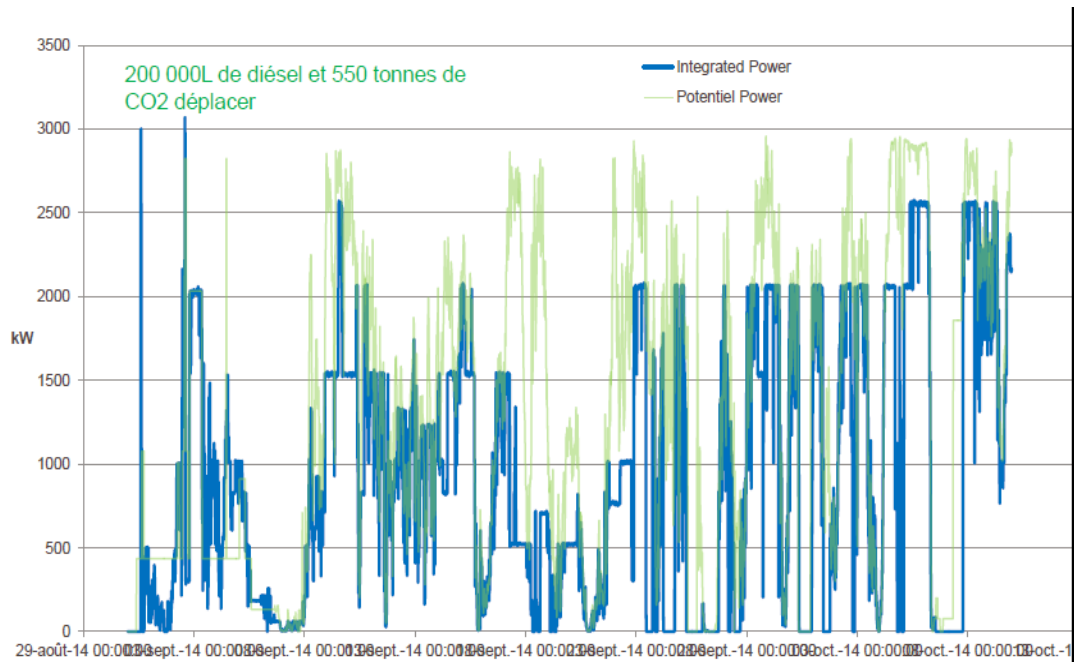


Figure 3: Les résultats après un mois d'essai d'opération

6. Conclusion

Ce projet pilote est un début pour un projet d'un parc éolien en Arctique. En effet, l'objectif de la mine est de disposer d'un parc éolien où la puissance devra réduire près de 40% de la consommation de diesel avec des éoliennes de 9 à 12 MW. La mise à l'essai d'une seule éolienne permet de former du personnel, en connaissance du profil de risque.

L'avantage pour le Canada est que ce projet contribue au changement du paysage énergétique en Arctique et le secteur minier canadien. Dans cette région peu d'options sont offertes pour s'affranchir du diesel, mise à part l'éolienne à haute pénétration. La réussite de ce projet sera un ambassadeur pour l'éolien dans la région afin de convaincre les exploitants miniers et les fournisseurs d'énergies dans les communautés éloignées de la viabilité d'autres options que le diesel.

Outre le bénéfice environnemental qu'apporte un tel projet, mais aussi la production et le stockage locaux d'énergie, il offre un mécanisme pour améliorer la robustesse économique au Canada, la durabilité, l'acceptabilité sociale des projets miniers et une meilleure harmonisation de la mise en valeur des ressources du nord avec le respect des traditions des peuples autochtones [15], [16].

2.5 CONCLUSION

Les ENR font désormais partie intégrante du secteur énergétique mondial et ce, à raison du potentiel qu'elles possèdent en matière de développement durable, de la lutte contre le réchauffement climatique et dans la réduction des GES. Ce chapitre a fait un bref survol du potentiel en ENR du Nord canadien principalement afin d'explorer les ressources exploitables et celles qui sont déjà exploitées. La mise en contexte dans le Nord canadien est un très bon exemple pour les autres régions nordiques à cause de la volonté des gouvernements dans la lutte contre le réchauffement climatique, la contribution pour un développement et une gestion durable des ressources.

La réalisation du projet éolien de la mine Diavik et Raglan ont prouvé la faisabilité d'un tel projet dans un contexte de climat froid, avec les technologies adaptées dont nous allons explorer en détail par la suite. La réussite du projet a ouvert les opportunités pour l'éolien en région nordique et pour les ENR en général.

CHAPITRE 3

LOGISTIQUE ADAPTÉE AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN RÉGIONS NORDIQUES ET ISOLÉES

3.1 INTRODUCTION

Les localités isolées des régions nordiques ou d'ailleurs dans le monde ont mis en place une structure organisationnelle permettant la vie et l'acheminement de divers éléments nécessaires à la vie dans ces régions. Pour les régions où les conditions environnementales rendent difficile cet acheminement, cette organisation nécessite une attention particulière.

Dans le cadre du déroulement d'un projet en région nordique, les phénomènes présents dans ces régions accentuent le niveau de difficulté dans la réalisation. Ces phénomènes doivent être pris en compte dès la phase préparatoire du projet. Les basses températures, la neige, le vent, le givre ou encore les pluies verglaçantes rendent difficiles toutes les phases de réalisation du projet. Les hivers longs ainsi que la noirceur réduisent significativement le temps de réalisation s'avèrent être une surcharge au budget initial du projet.

Pour le projet de développement des énergies renouvelables, si ailleurs, dans les zones tempérées ou les zones chaudes les critères d'installation des projets des énergies renouvelables(ENR) sont beaucoup plus souples du point de vue climatique, il reste cependant un facteur important dans les régions froides ou nordiques, voire une barrière au déploiement et à l'exploitation de celles-ci.

Plusieurs aspects doivent être considérés lors de l'étude de faisabilité du projet. L'aspect logistique quant à lui, est un des aspects qui y jouera un rôle important tout au long du processus de réalisation et d'exploitation du projet. Par définition la logistique est un terme emprunté à l'armée. Il est apparu dans le langage militaire au milieu du XIX siècle, comme la gestion des troupes nécessitait une administration centralisée. C'est ainsi que ce terme fut employé. On peut la définir en terme militaire comme étant l'art de combiner tous les moyens de transport, de ravitaillement et de logement des troupes[20]. Appliquée à d'autres secteurs d'activités, elle est définie comme étant l'ensemble des moyens et méthodes permettant l'organisation ou la mise en place d'un service comprenant la gestion du flux de matière avant, pendant et après les activités, la gestion de transport, du stock, mais aussi du personnel. La logistique s'intéresse donc à la planification et au suivi des matières dans leur mouvement en vue de satisfaire un besoin. La mise en place d'une logistique efficace peut se résumer en ces quatre questions : (1) Quoi ? Quel produit livrer ou réceptionner ; (2) Où ? À quel endroit ? (3) Quand ? À quel moment ?, comment ?(4) Quels moyens mettre en œuvre?[20]. Le bon déroulement du projet dépend donc de la bonne logistique mise en place en fonction de ces quatre questions de base. Dans le domaine industriel, la structure logistique peut être décomposée en: une logistique d'approvisionnement des matières nécessaires à l'activité industrielle, une logistique de production (flux interne des matières dans les usines et entre les sites de productions), une logistique de distribution (acheminement des biens aux clients)[20].

Le but de ce chapitre est donc de rassembler, d'après les données disponibles dans la littérature, les éléments à considérer dans la mise en place d'une logistique adaptée à l'implantation du projet à ENR dans les régions nordiques; en se référant aux projets déjà existants, aux difficultés rencontrées lors de l'étude de préfaisabilité, de faisabilité et ainsi que lors de la réalisation, de se servir des notions de base de la logistique tant du point de vue de la planification, de la gestion, que des outils informatiques. Ceci afin de les adapter au projet de développement des ENR en région nordique et isolée dont nous ferons études de cas par la suite. Dans ce contexte, la logistique dite de soutien technique accompagnera le projet au niveau de la conception, de la réalisation et de l'exploitation du projet.

3.2 PRESENTATION DE LA LOGISTIQUE EN REGION NORDIQUE

Cette section fait une brève présentation de la logistique en région isolée nordique. Comme dit ci-haut, la logistique ce terme d'emprunt militaire, ne pourrait avoir une seule définition. Cependant, en région nordique la logistique devrait s'adapter aux conditions climatiques d'extrêmes basses températures, à l'éloignement et à l'accessibilité rendue difficile selon la localisation du site.

3.2.1 Les composantes de la logistique en région nordique

Les composantes de base de la logistique en région nordique peuvent être les mêmes dépendamment de l'application. Les composantes auxiliaires peuvent elles, par contre, être différentes. Celles identifiées dans l'article paru dans le journal de l'ingénierie pour les régions froides (journal of cold regions engineering) en 1992 [21] concernaient la planification et la gestion logistique en régions froides et isolées en raison l'attraction dont faisaient l'objet ces régions par la découverte de ressources minérales (pétrole, gaz naturel, diamant, or, etc.). Celle-ci aurait occasionné un déploiement des industriels du secteur vers des régions plus froides dont l'accès était limité à certaines périodes de l'année. La réussite de ces différents projets dépendait donc de la logistique de fonctionnement qui était mise en place.

Les composantes ont été énumérées dans un contexte de basses températures et pour des projets à moyen terme. Les éléments qui ont été cités sont : la situation géographique, les personnels, les équipements, les transports, les provisions, les infrastructures, les facteurs externes, les utilitaires. Un degré de variation d'importance existe au niveau de chaque opération. Celui-ci est fonction de la taille, du type, de la durée du projet, de la disponibilité de la ressource, et de la situation géographique. Les détails sur l'apport de différentes composantes dans l'élaboration de la logistique efficace sont donnés comme suit :

- **La situation géographique :** composante qui affecte quantitativement et qualitativement les décisions pour les autres composantes. Les raisons évoquées dans un contexte de basse température sont que souvent ces régions sont éloignées et isolées des autres grandes agglomérations. Les choix à adopter pour les restes des composantes dépendent donc largement de la localisation du site cible, des autres sites à proximité ou encore d'un centre de transport proche [21].
- **Les personnels :** incluent non seulement les travailleurs (ouvriers, ingénieur, technicien, gestionnaire, administrateurs, etc.), mais aussi tout personnel nécessaire au campement du site. Le personnel médical, les personnels qui s'occupent de l'aspect humain du travail dans des conditions extrêmes (psychologue, personnels récréatifs, etc.). Les régions nordiques sont difficiles. Les travailleurs devront être préparés à travailler dans les conditions extrêmes des régions nordiques pour ainsi éviter toute forme de stress causé par l'éloignement et l'isolement. Les accidents sont généralement les conséquences d'un manque de préparation ou de lacunes lors de celle-ci. Il est recommandé de prévoir des activités récréatives tel le sport, le cinéma et autres afin de réduire les risques de stress[21].
- **Les équipements :** le choix des équipements est primordial. L'éloignement et les conditions climatiques font que le remplacement de certains équipements pourrait être long. Les équipements choisis devront répondre à une certaine série de critères comme la complexité d'opération, la durabilité, la réparation et la maintenance. Pour les équipements destinés aux travaux à l'extérieur, la résistance au froid est un autre critère. Ces équipements sont généralement les équipements de communication, des équipements scientifiques, équipements de soutien sur le terrain, des équipements pour les ouvriers, et des équipements pour les activités récréatives[21].

- **Les provisions** : Une mauvaise planification dans la gestion des provisions peut affecter l'efficacité et la productivité des opérations. Comme éléments nécessaires dans la provision on peut citer : les denrées alimentaires, les équipements ou matériels de production, le fioul pour l'alimentation en énergie (électricité, chauffage, véhicule)[21].
- **Les habitations** : En région isolée, on distingue trois types d'habitations selon la durée des opérations : les habitations permanentes, semi-permanentes et mobiles. Les extrêmes basses températures étant la caractéristique de ces régions durant la majeure partie de l'année, ces habitations doivent répondre aux exigences d'efficacité énergétique spécialement pour les habitations permanentes. La transportabilité, l'assemblage et le désassemblage de ces habitations peuvent également contribuer à la réduction de coût des opérations[21].
- **Le service public** : D'autres éléments à considérer lors de la planification en région froide sont les besoins en énergie (électricité, chauffage, etc.), l'approvisionnement en eau potable, les systèmes de communications (téléphone, internet, télévision, radio, satellite), la gestion de déchet pour protéger l'environnement. Ces éléments doivent être considérés lors de la planification de la logistique[21].
- **Les transports** : Ils augmentent les coûts des opérations en régions isolées et éloignées. En climat nordique, il est encore plus dispendieux, car durant certaines périodes de l'année certaines voies sont inaccessibles (route et mers). Le transport par voie aérienne, lui, non seulement revient plus cher que par voies routières ou par voie maritime, mais aussi il dépend des conditions climatiques. Lors d'un blizzard, il est impossible pour un avion de décoller. Au moment de la planification, il faudrait identifier les agglomérations proches, ou encore les sites d'habitation ou industriels proches. L'agglomération proche permet d'éviter de parcourir de longues distances

entre le site cible et centre des opérations. Les localités nordiques proches afin de réduire la fréquence d'appel des modes de transport par une collaboration entre acteurs opérant dans la région. La communication entre différents secteurs est importante et peut contribuer à réduire le coût lié au transport venant de l'extérieure[21].

- **Les facteurs externes** : certaines démarches administratives peuvent ralentir ou encore entraver la mise en place d'une bonne logistique. L'obtention de toutes les autorisations par les autorités administratives locales dont dépendent directement ou indirectement les déroulements des opérations est importante lors de la planification de la logistique[21].

3.2.2 Critères d'évaluation des composantes logistiques

Il existe un degré d'importance entre les différentes composantes comme dit ci-haut. Les critères d'évaluation peuvent également être fonction de la taille, du type, de la durée du projet, de la disponibilité de la ressource, et de la situation géographique. Comme critères d'évaluation, on peut citer : le coût, la maintenance, la disponibilité, le temps de livraison, l'exigence de formation, la complexité d'opération, la performance, le potentiel impact sur l'environnement, le potentiel de réutilisation, la durée de vie, et la gestion de risque et de la sécurité [21].

3.3 IDENTIFICATION DES DOMAINES D'ACTIVITES DANS LES REGIONS ISOLEES NORDIQUES ET ISOLEES LOGISTIQUES APPLIQUEES

Plusieurs secteurs d'activités ont été développés durant les dernières décennies dans le vaste territoire nordique. Les habitants de ces contrées lointaines ont appris durant des siècles comment y survivre. L'expérience des autochtones a été primordiale pour une nouvelle vague d'arrivants dans ces régions (chercheurs, industriels, touristes, etc.). L'activité de la recherche, elle, y est présente depuis plusieurs décennies déjà et joue un rôle important dans ce milieu. Les différents changements que connaît cette partie du

monde en constituent l'une des raisons. Autochtones et chercheurs ont tous constaté des changements dans l'environnement nordique avec des températures plus douces entraînant avec elle la fonte des glaciers, du pergélisol, la modification de l'habitat de la faune, etc. Il ne reste plus à prouver les conséquences de l'activité humaine sur le changement climatique, malgré le fait que ces régions isolées du nord et de l'extrême nord n'ont pas connu d'activité industrielle intense sur des longs termes ; elles subissent néanmoins les conséquences de ceux d'ailleurs. D'où la nécessité de maintenir une équipe permanente de chercheurs dans ces régions d'une part afin de mesurer l'impact réel du changement climatique sur l'habitat naturel de différentes espèces animales, sur l'évolution de glacier, sur la géologie ou la géomorphologie des régions nordiques et, d'autre part, les ressources terrestres, sous-marines ou souterraines constituent également un autre champ de recherche dont l'intérêt s'est vu accentué depuis quelques décennies déjà.

L'attraction de certains acteurs industriels sur les ressources de l'arctique a conduit au développement de l'industrie minière, pétrolière, etc. Ces secteurs industriels nécessitent généralement des gros investissements. Ainsi, avant tout engagement d'un projet dans ces régions, une étude de faisabilité doit être faite. Elle sera justifiée donc par l'activité de recherche mise en place au préalable[22].

Ainsi, la découverte de l'or, du pétrole et autres minerais dans ce milieu, aurait conduit à plusieurs activités de recherche sur le sous-sol que les régions nordiques contiennent. Inexploitée depuis des siècles d'aucuns estiment qu'elles contiendraient les réserves mondiales du pétrole enfouies sous la banquise. L'enjeu politique y est donc très important. Plusieurs pays circumpolaires tentent de marquer leur influence et souveraineté sur les territoires de l'extrême nord. D'après les données fournies par *The Raw Materials Group* spécialiste dans l'analyse de l'industrie minière, plus de 200 cents projets miniers en arctique ont été annoncés avec seulement six projets opérationnels actuellement. Nombre de ces projets ont été soit abandonnés, soit encore en stade de planification. La directrice de la division de mine du *Worldwide Recruitment Solution(WRS)* Lucy Donald l'explique comme ceci : «*En dépit du fait des ressources minières exploitables, les organismes*

internationaux du secteur minier ont mis en attente les projets de l'extrême nord suite aux fluctuations que connaît le secteur minier et à la chute du prix des minerais ».[23]

Vu les variations que connaît souvent le secteur minier, de l'exploration à l'exploitation et au marché, il se passe généralement un temps assez long avant que la mine ne soit rentable. Dans les régions froides, l'exploitation minière est non seulement difficile, mais aussi la grosse machinerie à mettre en place revient plus coûteuse qu'ailleurs dans le monde, mise à part le fait que l'investissement dans une mine demande des sommes colossales. Cependant, la réussite des projets tels que les mines de Baffin lands, Raglan, Diavik, etc., sont une preuve qu'il est possible d'exploiter les minerais dans ces conditions climatiques, ceux-ci donnent alors une piste de solution afin de contrer les effets du climat et autres difficultés rencontrées en régions nordique[23].

Les besoins de chaque secteur d'activité étant différent, ces secteurs ont su développer au cours des années une logistique propre sur le plan de transport, de la gestion des marchandises et du personnel, du soutien technique, du stockage de marchandises, du support énergétique, ainsi que de la santé et de la sécurité, etc. Un survol de la logistique de chaque secteur est nécessaire, en explorant les besoins de chacun.

3.3.1 Pour les autochtones

Les besoins des communautés isolées sont pareils qu'ailleurs. Cependant l'éloignement de ces dernières pose souvent des difficultés au gestionnaire quant au besoin immédiat. Une planification à l'avance est requise dans ces conditions. Le gestionnaire doit s'assurer de la continuité des services. Les villages doivent être ravitaillés en denrées, en énergies pour le chauffage, l'éclairage et autres usages. Le fioul pour les groupes diesel est transporté de l'extérieur. Le gestionnaire devra assurer un approvisionnement continu, la mise en place d'une structure en cas d'urgence, souvent l'appel à un moyen de transport plus rapide, un avion par exemple, pour répondre aux situations d'urgences ou autres situations nécessitant une réaction immédiate.

3.3.2 Pour la recherche

La logistique en elle-même n'est pas une recherche, mais elle fait partie intégrante de la structure mise en place. Elle représente dans certains cas le tiers du budget de la recherche, cas du National Science Foundation (NSF). Dans les années 70 elle représentait de 20 à 80 pour cent du coût total des opérations menées en Arctique par le département de la défense américain[21]. Au fil des années ce coût s'est vu réduit avec le développement de la technologie et de la communication inter agence. Selon le rapport publié en 1997 intitulé : «*Logistics Recommendations for an Improved US Arctic Research Capability*» produit par la *commission Américaine de la recherche en arctique*, dont le but était de rassembler les besoins réels de la recherche en arctique en termes de logistique. Le groupe de chercheurs et fournisseurs logistiques chargés du rapport ont conclu aux points suivants : 1) tout d'abord établir une mise au point des besoins logistiques en arctique, 2) ensuite la justification de 22 millions de dollars en plus du budget du National Science Foundation (NSF) pour la logistique, 3) la création en 1999 du programme the Arctic Research support and Logistics (RSL). A cet effet, en 2003 une mise à jour du rapport de 1997 a été publiée par ARCUS (Arctic Research Consortium of the United States) nommé The Arctic Research support and Logistics : *Strategies and recommendations for system scale-studies in a changing environment*. Cette nouvelle version relate de l'évolution qu'a connue la logistique en Arctique, du changement dans l'environnement et du développement de la technologie adaptée à mettre en place.

3.3.3 Pour les industries

Les activités industrielles dans le nord ont mis en place une structure de gestion où la logistique est une donnée importante. Pour les industriels œuvrant dans des conditions extrêmes de basses températures, la logistique constitue un défi à relever. La viabilité des activités dépend de la chaîne de logistique mise en place, l'acheminement des matières premières, l'approvisionnement des sites industriels sur le plan technologique et humain. La logistique reliée au transport des marchandises et des personnes est souvent confiée aux

sociétés de gestion logistique opérant dans les régions isolées nordiques. L'expérience qu'elles ont acquise au fil des années est primordiale pour les nouveaux projets de développement dans le secteur.

3.4 MODELE DE PLANIFICATION POUR PROJET EN REGION NORDIQUE ET ISOLEE

Le modèle suivant a été mis en place pour des projets à moyen terme, mais peut aussi être applicable pour tout autre projet, quelle qu'en soit la durée de vie[21].

Le modèle est composé de trois phases : la phase pré-opérationnelle, la phase opérationnelle et la phase post-opérationnelle. La figure suivante présente le résumé du modèle[21].

- La phase pré-opérationnelle : elle comprend les objectifs du projet, les critères de sélection des composants, l'approvisionnement, la livraison, les provisions et le transport[21] .
- La phase opérationnelle : elle comprend le but visé par le projet, pendant ce temps les performances de chaque composant sont notées et documentées[21]
- La phase post-opérationnelle : elle comprend le démantèlement, le nettoyage du site, la gestion des déchets.

Les informations notées lors de trois phases serviront de bases sur lesquelles se référeront les futurs projets en régions isolées nordiques. Elles peuvent être modifiées et développées [21]. D'après l'article [21], ces modifications et mises à jour sur base d'expériences d'opération passée contribuent à la nature dynamique du processus de planification en ce qui concerne la logistique dans ces régions ; outre le fait d'améliorer la productivité opérationnelle et l'efficacité de futurs projets en environnement extrême.

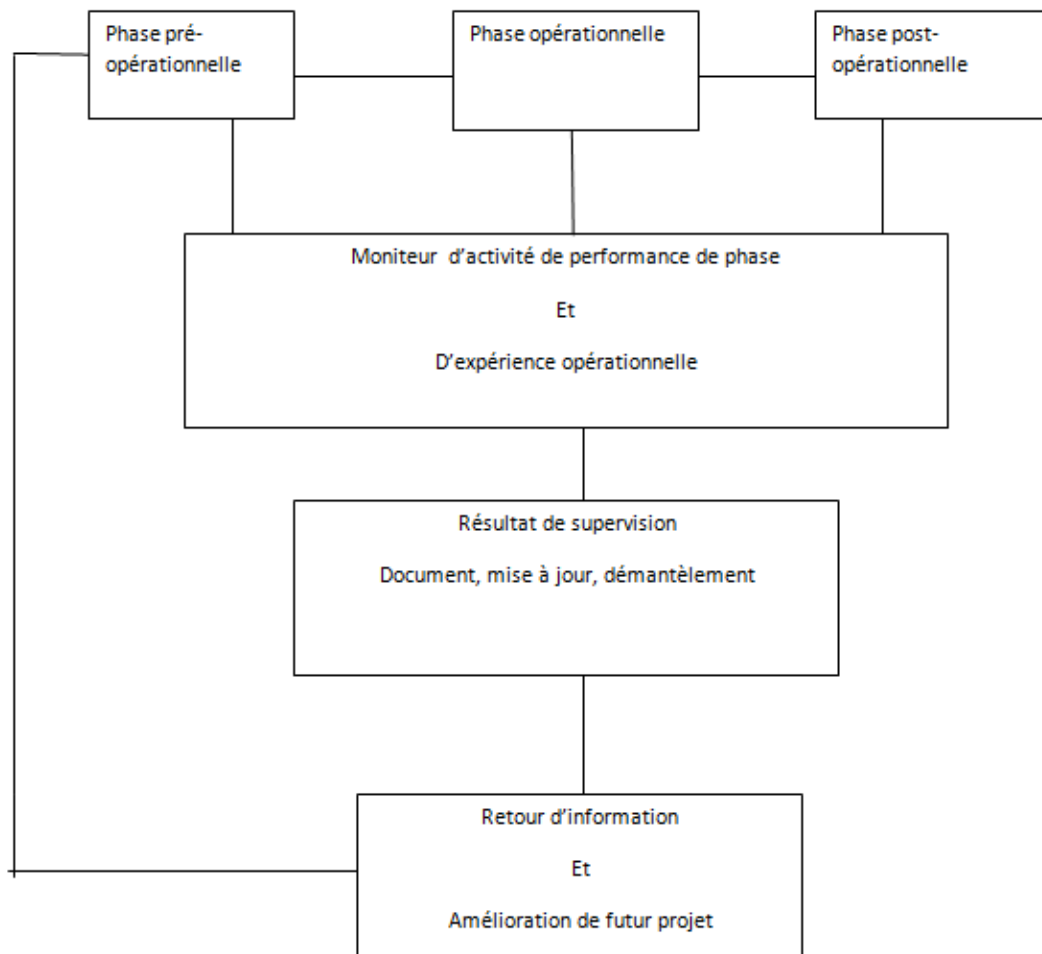


Figure 4: Processus de planification dynamique[21]

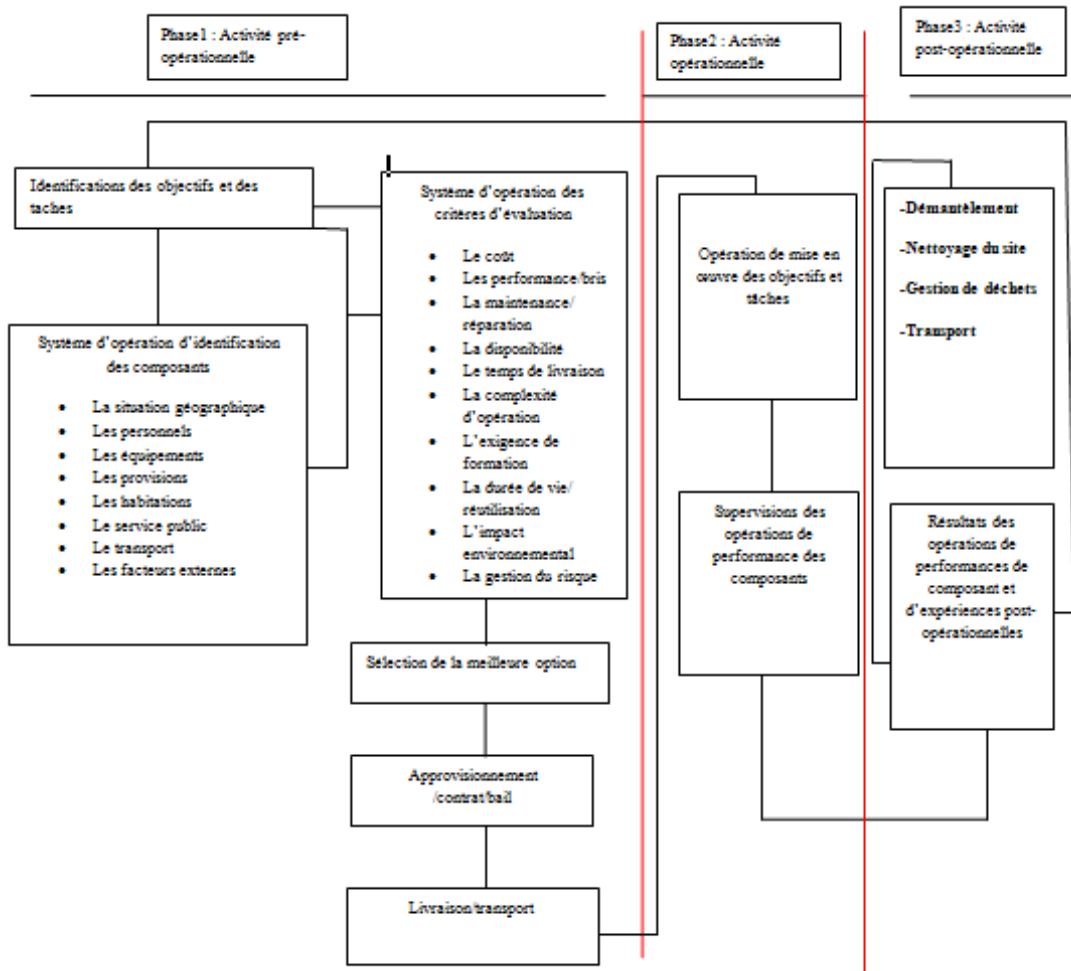


Figure 5: Système de planification des opérations logistiques en site isolé[21]

3.5 MODELE DE PLANIFICATION POUR PROJET DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN REGION NORDIQUE ET ISOLEE

Les projets de développement des énergies renouvelables constituent un enjeu important dans le paysage énergétique des régions nordiques, d'autant plus que le développement du projet en soi demande une bonne connaissance du site, des phénomènes atmosphériques propres au site. Ainsi, la logistique en région nordique pour des projets des ENR est une logistique sur base d'exploitation c'est-à-dire que cette logistique a pour vocation d'accompagner toutes les phases du développement du projet de la conception à l'exploitation ou encore la mise en service.

La démarche dans ce cas tiendra compte des données de base sur le développement des projets dans ces régions, du processus de planification dynamique et du système de planification logistique des opérations en site isolé.

L'article [24] paru en 2007 *Mapping Operations, maintenance and support design factor in arctic environments* concernant l'industrie pétrolière œuvrant dans la mer de Barents, cite les étapes à considérer lors de la mise en place des opérations dans cette région et des défis à relever. Ces étapes à sont :

- Une étude d'évaluation
- Une modélisation et visualisation
- Une estimation des coûts

Les facteurs environnementaux influenceront également chaque étape de l'évolution du projet. Ces facteurs sont des données importantes à rentrer à chaque étape d'avancement du projet.

Pour les projets d'exploitations des ENR, si ailleurs dans le monde les éléments à considérer tels que la disponibilité de la ressource, l'impact environnemental, ou encore l'acceptation sociale sont importants, en régions nordiques quoique peu peuplées ces

éléments sont aussi à considérer dans la mise en place du projet. La logistique pour projet à ENR s'appliquera lors des trois étapes du projet à savoir :

- La conception
- La réalisation
- L'exploitation

Le détail de chaque étape permettra de comprendre l'influence de la logistique avec les données de planification requises et les éléments à considérer.

1. **La conception** : elle comprend les objectifs visés par les projets. Elle est suivie d'une étude de pré-faisabilité et de faisabilité. Lors de la recherche sur le terrain en région froide et isolée, les scientifiques et chercheur ont besoin d'un soutien logistique adéquat. Pour des projets en région froide, elle correspondrait à la phase pré-opérationnelle de la logistique en site isolé selon le modèle présenté ci-haut. Tous les éléments sont à considérer : l'étude du terrain, la disponibilité de la ressource, l'exploitabilité de la ressource, l'impact environnemental, l'acceptation sociale (documents administratifs et autres).
2. **La réalisation** : elle correspond à la phase opérationnelle de la logistique. Elle concerne la mise en place des éléments relevés lors de la conception. Les facteurs environnementaux influencent fortement cette étape. Le temps de réalisation étant réduit en région nordique, ce facteur temps est primordial pour le bon déroulement du projet. De la planification logistique dépendra la réalisation du projet jusqu'à l'étape d'exploitation.
3. **L'exploitation** : elle concerne la mise en service du projet. Les éléments des phases opérationnelle et post-opérationnelle sont à considérer ici jusqu'à la fin de vie du projet. Une fois le projet mis en service, les données telles que le rendement énergétique, la maintenance, la réparation, le remplacement en cas de bris, l'approvisionnement, la santé et la sécurité, la gestion du risque, du flux d'énergie

ou encore du personnel sont à considérer dans la mise en place de la logistique d'exploitation du projet.

3.6 LOGISTIQUE ET OUTILS INFORMATIQUES

Dans son approche la logistique a pour vocation d'être stratégique, tactique et opérationnelle[20, 25] :

- Stratégique : aux questions stratégiques, elle remet en cause la quasi-totalité de l'organisation antérieure[25].
- Tactique : l'objectif du choix tactique est de répondre à moyen et à court terme à la nouvelle demande, aux dysfonctionnements constatés en modifiant les règles de pilotage, d'exploitation des ressources et de traitement de l'information[25].
- Opérationnelle : il s'agit ici de s'adapter aux nouveaux changements de situation. On peut distinguer deux cas : structurellement, où la situation se modifie chaque jour, et accidentellement, il s'agit d'une demande exceptionnelle, un arrêt improvisé, une non-disponibilité spontanée d'une ressource d'approvisionnement ou de distribution, ou encore une réponse à une demande urgente[25].

Les outils informatiques servent à l'optimisation de la logistique en tenant compte du volet stratégique, tactique et opérationnel des données logistiques dont ils disposent. Dans le cadre de l'optimisation de la structure organisationnelle à mettre place. Les algorithmes de Dijkstra et Kruskal servent respectivement à réduire le coût de transport en choisissant le chemin le plus court et à réduire le coût d'exploitation tout en acheminant chaque marchandise au point de réception[20].

- La réduction du coût des transports : le chemin dans un graphe est une succession de sommets (x_1, x_2, x_k) , tel que deux sommets successifs sont toujours voisins (x_i, x_{i+1}) . Ce chemin est un arc du graphe. La longueur d'un chemin est la somme des longueurs des arcs qu'il traverse $\sum_{i=1}^{k-1} M(x_i, x_{i+1})$; avec $M(x_i, x_{i+1})$ la longueur de l'arc. Dans ce problème, la variable est le chemin $C = (x_1, x_2, x_k)$ on ne considérera que le chemin vérifiant $M(x_i, x_{i+1}) \neq \infty$ $X_1 = A$. Le chemin part d'A et $X_k = B$. Il arrive en B. Par définition, un cycle est un chemin qui passe deux fois par le même sommet, en supprimant la portion du trajet comprise entre deux passages on obtient un chemin plus court. Il existe un nombre fini de tels chemins que l'on pourrait tous les examiner. L'algorithme de Dijkstra est une méthode qui consiste à traiter un sommet à chaque étape en calculant la distance du sommet de départ A à ce sommet, ainsi que le chemin le plus court de A à ce sommet[20].
- La méthode du moindre coût : dans la structure du moindre coût, la variable est l'ensemble des arêtes retenues. En effet dans un graphe valué non orienté, on cherche à retenir le moins d'arêtes possibles pour permettre à deux sommets d'être toujours reliés. Par convention on parle d'arêtes dans un graphe non orienté plutôt que d'arc. À titre d'exemple, si l'on cherche à construire un réseau ferroviaire ou informatique permettant de relier plusieurs points, que l'on possède un devis pour chaque liaison point à point, l'arbre couvrant le poids minimal décrira la manière la plus économique de construire le réseau en permettant à chaque point de communiquer avec d'autres. Pour cela, il suffit qu'à chaque étape d'ajouter à l'arbre l'arête de poids minimal qui ne créerait pas de cycle défini ici comme étant le chemin partant du sommet et revenant au même point [20] . L'algorithme de Kruskal aide à trouver la structure du moindre coût.

3.6.1 Temps d'exécution du programme

Le temps d'exécution d'un programme dépend généralement de la taille des données. Par exemple pour les algorithmes définis ci-haut, on décrira la taille de donnée par la longueur n du chemin testé et le nombre d'instructions exécutées est fonction de la taille des données [20].

La puissance de l'ordinateur ainsi que le soin apporté à la programmation sont des facteurs influençant le temps de calcul. Néanmoins, la performance du temps de calcul est déterminée par la méthode utilisée à un facteur multiplicatif près comparativement à une autre méthode. Ainsi, pour comparer l'efficacité de diverses solutions algorithmiques on a recours à la notion de complexité qui est le nombre d'opérations élémentaires effectuées par l'algorithme pour aboutir au résultat en fonction des données sur lesquelles il travaille. La complexité reflète le temps que met l'ordinateur pour calculer une solution. On la calcule en comptant le nombre d'opérations que l'ordinateur sera amené à effectuer pour calculer les résultats. Elle permet donc de s'intéresser à la manière dont ce nombre d'opérations augmentera avec la taille des données à traiter en négligeant les particularités de l'ordinateur tel que le facteur multiplicatif cité ci-haut[20].

Le facteur multiplicatif est représenté par la notation grand O , si un algorithme prend $c \times f(n)$ pour résoudre un problème de taille n , c peut être compensé par la puissance de l'ordinateur utilisé. On dit alors que la complexité de l'algorithme est en $O(f(n))$. Cette indication est pertinente surtout quand le nombre de n augmente. Le c représente les différences entre les vitesses de différentes machines et la notation O permet de s'affranchir de toutes considérations et de ne s'intéresser qu'aux comportements de l'algorithme. La complexité est une propriété inhérente à l'algorithme c'est-à-dire à la méthode de résolution choisie. Elle permet de décrire le temps nécessaire à la mettre en œuvre quand la taille croît[20].

Une complexité en $O(n)$ signifie que lorsque la taille du problème est multipliée par 2, sa résolution prend deux fois plus de temps. On parle ici de complexité « linéaire ». Une complexité en $O(n^2)$, prend 4 fois plus de temps on parle de complexité « quadratique ». De façon générale pour une complexité en $O(n^k)$, lorsque la taille du problème double, le temps de calcul est multiplié par une constante. De telles complexités sont dites « polynomiales ».

L'algorithme de Dijkstra a une complexité de l'ordre $O(n^3)$, avec n le nombre de sommets. Cette complexité peut même être réduite. En effet, l'algorithme s'arrête une fois que chacun des n sommets est traité. Or le traitement d'un sommet nécessite de considérer chacun des sommets non traités et chacun des voisins de ces sommets. Le traitement d'un sommet nécessitera donc plus $O(n^2)$ opérations élémentaires.

Les algorithmes ayant une complexité en $O(2^n)$ ou plus généralement en K^n sont dits algorithmes exponentiels. En augmentant la taille du problème d'une unité, on double le temps de calcul ou bien il est multiplié par la constante K . L'efficacité de tels algorithmes reste faible, et ces derniers sont applicables que pour de petits problèmes. De façon générale, le temps d'exécution en $O(n^k)$ augmente d'un peu plus de $\alpha\%$ (pour α petit). Par contre, pour l'algorithme de complexité exponentielle, la complexité est multipliée par K à chaque fois que l'on augmente la taille du problème résolu de 1. L'algorithme de complexité exponentielle est donc rapidement prohibitif, la moindre augmentation de la taille du problème coûte très cher en temps de calcul. L'algorithme polynomial par contre, l'augmentation du coût reste proportionnelle à l'augmentation de la masse de données traitées.

D'autres problèmes, sont « sans solution efficace » ce sont des problèmes des tournées et des découpes. Ces problèmes sont des problèmes types en logistique. On ne connaît pas de solutions efficaces à ces problèmes et toutes les solutions connues sont à complexité exponentielle. Il revient au logisticien de trouver la solution approchée du modèle qu'il cherche à optimiser tout en tenant compte des innombrables variables d'un problème, il pourrait aboutir à une solution qui serait exacte en théorie, mais qui serait trop

précise pour qu'il puisse concrètement la mettre en œuvre, sachant que la mise en œuvre d'une solution s'écarte toujours un peu de la théorie. La solution approchée serait une bonne base de travail pour la recherche d'un optimum appliqué dans un contexte logistique[20].

3.6.2 Programmation linéaire

Elle est une solution pour bien de problèmes logistiques. L'algorithme simplex en est une. Il permet de trouver l'optimum d'un programme linéaire. Des nombreux problèmes d'optimisation peuvent être modélisés sous forme de programme linéaire. L'algorithme du simplexe apporte des solutions dans le domaine de l'optimisation informatique. Il est proche de la méthode de Gauss pour inverser une matrice. La programmation linéaire résout des problèmes dont les variables sont des nombres réels et dont la fonction objective est linéaire comme $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_kx_k$. Les contraintes sont des inégalités entre des variables linéaires et une constante $a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jk}x_k \leq b_j$. Cette modélisation permet de représenter un grand nombre de problèmes. La variable x_i représente la quantité du $i^{\text{ème}}$ produit dans le plan de production, c_i représente le bénéfice unitaire du produit x_i ; $\sum_i c_i x_i$ est le bénéfice total à maximiser, a_{ij} est la quantité de la $j^{\text{ème}}$ ressource utilisée pour produire une unité du $i^{\text{ème}}$, b_j est la quantité disponible de la $j^{\text{ème}}$ ressource. Ainsi la somme $\sum_i a_{ij} x_i$ représente la quantité de la $j^{\text{ème}}$ ressource utilisée dans le plan de production. Cette expression doit toujours être inférieure ou égale à b_j $\sum_i a_{ij} x_i \leq b_j$. Pour chaque produit on utilise des ressources disponibles en quantité limitée. Ces ressources peuvent être les matières premières à transformer, le temps de travail, les machines disponibles, etc. [20]

3.7 HIERARCHISATION DE PRIORITES

Il arrive qu'il soit difficile de définir un ordre de priorité quand on est intéressé à optimiser plus d'un critère en même temps. Ce type de travail se nomme « Optimisation multi-objectifs ». La solution obtenue n'est pas unique, mais un ensemble des solutions optimales pour chacun de critères, les autres étant fixés. Cet ensemble de solutions est appelé Front de Pareto. À ce stade, l'informatique n'est pas en mesure de proposer une solution unique. C'est alors au gestionnaire de prioriser ses demandes et de hiérarchiser l'importance des différents objectifs afin de choisir parmi toutes les solutions du front de Pareto, celle qui répondra le mieux à ses besoins. À titre d'exemple, pour un problème qui cherche à transporter un maximum de produits, mais à coût minimal, ce type de problème est communément appelé problème du flot maximal à coût minimal. Dans ce cas-ci on cherche à optimiser deux critères dépendant des mêmes variables, le flot que l'on cherche à maximiser et le coût que l'on cherche à minimiser. Cependant, il y a une hiérarchie entre ces deux critères, parmi tous les flots maximaux, on va chercher celui qui est à coût minimal [20].

3.8 ORDONNANCEMENT DES TACHES

Les tâches doivent avoir une durée et des précédences, c'est-à-dire que l'on ne peut effectuer une certaine tâche après qu'une liste de tâches ne soit terminée. D'où la notion de planification. Une tâche est dite critique si elle ne doit subir aucun retard dans sa réalisation, car cela occasionnerait un retard sur l'ensemble du projet. Il existe différentes méthodes pour résoudre ce type de problèmes, dont la méthode des potentiels Métra et celle de PERT (programm evaluation and review technic) [20].

3.8.1 Méthode de potentiels Métra

Cette méthode conduit à la construction du graphe de précédences, et représente les règles de précedence entre les tâches. Chaque sommet du graphe représente une tâche et un arc va d'un sommet i à un sommet j , si i doit être terminé avant que j ne commence. Ensuite, on construit deux sommets en plus, d et f , qui représentent respectivement le début et la fin du projet. Les tâches n'ayant pas d'antécédent prennent d pour antécédent et celles n'ayant pas de successeur prennent f pour successeur. Chaque arc a pour poids la durée de la tâche dont il est issu. Ceux issus de d ont un poids nul[20].

Ainsi, à partir de ce graphe, on peut calculer la date au plus tôt de chaque tâche. Autrement dit, la date avant laquelle la tâche ne peut commencer. La tâche d a pour date au plus tôt zéro. Pour tout autre sommet, il ne peut commencer avant que les tâches dont il dépend soient terminées. Sa date au plus tôt correspond au maximum des dates au plus tôt de fin des tâches dont elle dépend. La date au plus tôt de fin est la date au plus tôt de la tâche augmentée de la durée de cette tâche[20].

La tâche est critique si sa date au plus tôt et sa date au plus tard sont égales. Les tâches critiques forment toujours un chemin du sommet d au sommet f . La marge totale d'une tâche est le retard maximum qu'elle peut prendre sans remettre en cause le projet. C'est la différence entre les dates au plus tôt et les dates au plus tard. La tâche critique est celle dont la marge totale est donc nulle. La marge libre, elle, est le retard que peut prendre une tâche sans entamer le retard autorisé par la tâche dépendant d'elle. Elle est toujours inférieure à la marge totale tout au plus égale à la marge totale. D'une certaine manière, on veut que toutes les tâches liées par une relation de précedence à la tâche considérée commencent à leurs dates au plus tôt. Ce dernier est égale au minimum des dates au plus tôt des tâches suivantes moins sa date au plus tard. Elle reste toujours inférieure à la marge totale. Ainsi donc, il est possible de faire un planning concret du projet ayant toutes ces données requises au préalable[20].

3.8.2 Méthode de PERT

Cette méthode permet d'évaluer la durée de réalisation d'un projet. Elle est une solution pour le problème d'ordonnement. Les différentes tâches du projet ne pourront être réalisées simultanément. Certaines tâches devront être achevées avant que d'autres ne puissent débiter [26, 27].

Dans sa forme globale, l'échéancier du projet devrait comprendre les différentes tâches à réaliser, leurs durées et les contraintes d'antériorités qui devront être respectées. Ensuite, construire le graphe de PERT à partir de l'échéancier. C'est un graphe valué dont les arcs sont les tâches, les valeurs des arcs sont leur durée et les sommets représenteront les états d'avancement du projet numérotés de 1 à n [26].

Pour le construire, il faut :

1. Déterminer le niveau de tâche : le niveau 0 est pour les tâches qui n'ont pas de tâches antérieures et le niveau 1 pour les tâches dont le niveau antérieur est 0. Les tâches de niveaux $k+1$ sont les tâches dont les tâches antérieures sont des niveaux inférieurs avec au moins une tâche de niveau k avec elles [26, 27].

Le graphe est construit en traçant les tâches par ordre croissant.

2. Déterminer les tâches commençantes, finissantes et convergentes. Les tâches commençantes sont celles sans tâches antérieures. Elles partent du sommet 1 du graphe dit « entrée du graphe ». Les tâches finissantes sont celles qui ne sont pas tâches antérieures. Elles arrivent au sommet terminal du graphe dit sortie du graphe. Les tâches convergentes sont celles que l'on rencontre toujours ensemble dans la colonne de tâches antérieures. Elles auront le même sommet terminal [26, 27].
3. Déterminer les dates et marges : les dates au plus tôt notées t représentent le temps minimum nécessaire pour atteindre ce sommet. Elles se déterminent par ordre de sommet croissant à partir de l'entrée du graphe. Les dates au plus tard, notées T ,

représentent la date à laquelle cet état doit impérativement être atteint si l'on ne veut pas augmenter la durée totale du projet. Elles se déterminent par ordre de sommet décroissant depuis la sortie du graphe. Pour tout sommet, t est toujours inférieur ou égale à T . Ainsi donc $T-t$ est appelé marge de flottement du sommet. La marge libre notée ML est le retard maximal que peut prendre la réalisation d'une tâche sans conséquence aucune sur les tâches suivantes. La marge totale notée MT est le retard maximal que peut prendre une tâche sans retarder l'ensemble du projet. Si la durée d'une tâche augmente, cette augmentation sera absorbée par la marge de la tâche. Seul le surplus se répercutera sur la durée du projet [26], [27].

3.9 ETUDE DE CAS : PLANIFICATION LOGISTIQUE DU PROJET EOLIEN DE LA MINE RAGLAN

Au chapitre 2, nous avons fait une présentation du projet de la mine Raglan sans évoquer l'aspect logistique ayant entouré le processus d'implantation du projet.

Dans cette section on s'intéresse particulièrement à l'aspect logistique du projet. La mine possède sa logistique interne liée au fonctionnement et à l'exploitation de la mine (gestion du personnel, réapprovisionnement, gestion du risque, etc.). Cependant, pour le projet éolien il a fallu mettre en place une structure logistique qui permettrait de mener à bien le déroulement du projet. Les informations ont été fournies par l'équipe de Tugliq énergie responsable du projet par l'entremise de Mr Jérémie Barriault qui est technicien chargé de la maintenance de la turbine sur le site à Raglan.

D'après les données fournies par Mr Barriault, nous avons pu ressortir les éléments évoqués au chapitre 2 et 3 afin de faire une mise en contexte de la logistique en région nordique liée à l'exploitation des ENR.

Comme il a été cité selon le processus de planification dynamique pour projet en site isolé (Réf. Figure4) les trois phases que comprend celui-ci, à ce stade on s'intéressa qu'aux phases pré-opérationnelle et opérationnelle du projet.

3.9.1 Pour la phase pré-opérationnelle

Une fois les objectifs du projet fixés, la campagne de mesure du vent s'en est suivie, afin de concrétiser l'étude de faisabilité, elle dura 3 ans. Les étapes de l'installation commencèrent par l'achat de la turbine chez le manufacturier Enercon une commande spéciale depuis l'Allemagne d'une turbine adaptée au climat froid avec le kit complet. Le transport s'est fait par bateau. Une fois au port de Québec les équipements devaient être acheminés sur le site d'implantation à Raglan, les pales et la nacelle étaient entreposées dans des conteneurs de 40 pieds. Avec un calendrier serré ne disposant que de deux périodes pour l'acheminement des tous les équipements (le kit de la turbine et les équipements de l'installation excavatrice, grue, etc.) ; ces périodes étaient soit du 1 mars au 24 juin, soit du 15 mars au 20 juin, il a fallu 7 à 8 voyages pour tout acheminer.

Durant l'installation de la turbine, deux facteurs importants auraient pu contraindre l'installation il s'agit du climat et de la durée de réalisation.

- Pour le climat : la ressource éolienne est abondante avec des vents de classe 1 sur le site à Raglan, les journées sans vent sont rares, cela a posé un problème lors de l'érection de la turbine, au-delà de 25 km/h les travaux devaient être arrêtés pour éviter tout risque et assurer la sécurité (personnel, équipements, etc.)
- Pour la durée de réalisation : l'hiver dure 11 mois à Raglan, l'équipe ne disposait que d'un mois pour tout finaliser. Ce facteur a beaucoup influencé le processus d'installation aucun retard n'était permis toutes les tâches étaient considérées comme critique, tous les éléments ont été acheminés sur le lieu d'installation tôt afin de débiter l'installation et éviter tout risque de retard.

✓ **Pour la phase construction**

- En site isolé il se pose un problème de la disponibilité des équipements de levage.
- Excavation du terrain : une des conséquences du réchauffement climatique fait que le pergélisol en dégel pose un problème pour la stabilité du sol. Ceci est une autre donnée critique pour la fondation de la turbine.
- En site isolé l'accès au béton est très difficile, le sol est rocheux en plus les variables de température ne sont pas bonnes pour le bétonnage, une deuxième donnée critique pour la fondation. Par exemple 1m^3 de béton coûte environ 3000 dollars ce qui revient très cher. La solution retenue était la fondation de type spider (Réf. Figure 2), où on a creusé le sol de 15 à 20 m on y a placé 12 pieux pour soutenir le mât de la turbine, cela n'a demandé que 30 m^3 de béton.

Selon le rapport sur l'Étude d'impact sur l'environnement (EIE) – Projet d'énergies éoliennes à Katinniq (site d'implantation de la turbine) réalisé par le groupe Genivar en 2013 pour Xstrata Nickel Mine Raglan la phase de construction comprend les étapes suivantes[28] :

- Le décapage : la préparation du terrain, l'enlèvement des végétaux sera effectué sur les aires de travail et sur le chemin d'accès.
- L'aménagement des chemins d'accès : les chemins existants seront utilisés pour accéder aux emplacements prévus. Ils seront modifiés afin de permettre la circulation des équipements et de la machinerie lourde. Toute fois ces routes ont été construites pour assurer l'acheminement des minerais, les modifications seront donc mineures dans ce cas-ci. Il restera à aménager de nouveaux chemins d'accès pour accéder à la plateforme éolienne, ces routes doivent éviter de traverser tout fossé et ruisseau. L'accès aux éoliennes et aux

postes de raccordement nécessitera la construction des nouvelles routes et la réfection de celles existantes.

- Pour la livraison des équipements, elle se fera au port de la baie Déception situé à 420 km du site d'implantation, l'accès au site se fera par voie routière.
- La mise en place des équipements : elle comprend les activités nécessaires à la préparation de fondations ainsi qu'à l'assemblage et l'installation de l'éolienne, du réseau collecteur, du poste de raccordement et du mât météo et de l'excavation.
- La préparation de fondation : la surface nécessaire devra être défrichée et nivelée à l'aide d'une pelle mécanique équipée d'un marteau à percussion. Afin de supporter le poids de grues, l'érection de l'éolienne nécessitera la construction d'une base pour l'installation d'une grue à l'intérieur des aires de travail, cette base est composée du gravier compacté et demeure en place après la construction puisqu'elle sera nécessaire pour la maintenance des éoliennes en cas de bris. Quant à l'aire prévue pour le système de stockage à l'hydrogène, elle couvrira une superficie d'environ 750 m².
- L'installation de la turbine et des équipements afférents : pour ériger la turbine, une grue de 400 tonnes est nécessaire. L'assemblage débute avec l'installation des différentes sections de la tour assemblée à l'aide des boulons et retenues ensemble à l'aide de câbles de post-tension pour les sections en béton. Ensuite la nacelle et le générateur sont installés l'une après l'autre sur le dessus de la dernière section de la tour, puis assemblés à l'aide de boulons. Les trois pales et le moyeu sont fixés au sol pour former le rotor, une fois cette opération terminée, la grue hisse le rotor pour le connecter au générateur, cette opération nécessite l'assistance d'une grue de faible tonnage et des monteurs de structures pour stabiliser la charge. Une équipe d'ouvriers

installe les restes des équipements qui n'ont pas été assemblés en usine et effectue le raccordement électrique des différentes composantes.

- La mise en place du réseau collecteur : il se compose des câbles électriques de différent calibre opérant à un voltage de 34.5 kV, les boîtes de jonction. Ce système relie la turbine au poste de raccordement.
- La démobilisation et la restauration des aires de travail : à la fin de travaux de construction on procédera à la démobilisation des équipements et de la machinerie ainsi qu'à la restauration des aires de travail. Les matériaux pourront être réutilisés à cette occasion. Les chemins d'accès pourront être réduits.

3.9.2 Éléments d'optimisation de la logistique d'installation

Dans cette section on va utiliser la méthode de potentiels Métra MPM vue ci-haut afin de résoudre le problème d'ordonnancement. L'ordonnancement consiste à calculer un planning d'exécution de tâches en respectant les règles de précédences. L'ordre de réalisation des tâches est très important surtout pour un échancier aussi serré et dans ces conditions de réalisation (facteur vent et climat). Dans ce contexte les prévisions météorologiques sont très importantes afin de décider quelles sont les tâches qui pourront être réalisées et à quel moment. On revient donc aux questions stratégiques de la définition de la logistique. Dans ces conditions la démarche doit être stratégique, tactique et opérationnelle en tout temps. Il y a deux paramètres auxquels la logistique se mesure : sa capacité à respecter le plan et sa capacité à s'adapter aux changements, les erreurs de dysfonctionnements logistique sont souvent occasionnées par une mauvaise estimation[4].

1. Identification des tâches

Les tâches du processus d'installation seront codifiées en lettre majuscule d'A à Z, la durée de tâche sera préciser et leurs tâches antécédentes.

Tableau 1: Liste de tâches du projet

	Description de la tâche	Durée de la tâche	Antécédents
A	Livraison des équipements et matériaux de constructions (grue, excavatrice, pelle mécanique, etc.)	5jours	-
B	Excavation du terrain (préparation du site et chemin d'accès)	15jours	A
C	Mise en place des installations temporaires pour entreposage et habitation	7jours	A, D
D	Livraison de la turbine et équipements connexes	5jours	-
E	Préparation de la fondation de la tour	2jours	B
F	Mise en place et assemblage des composantes de la turbine	7 jours	C
G	Levage de la tour	4jours	F, E
H	Mise en service de la turbine	2jours	G
I	Démantèlement du site, restauration des aires de travaux et retour équipements au Sud	15jours	G

2. Construction du graphe de précedence

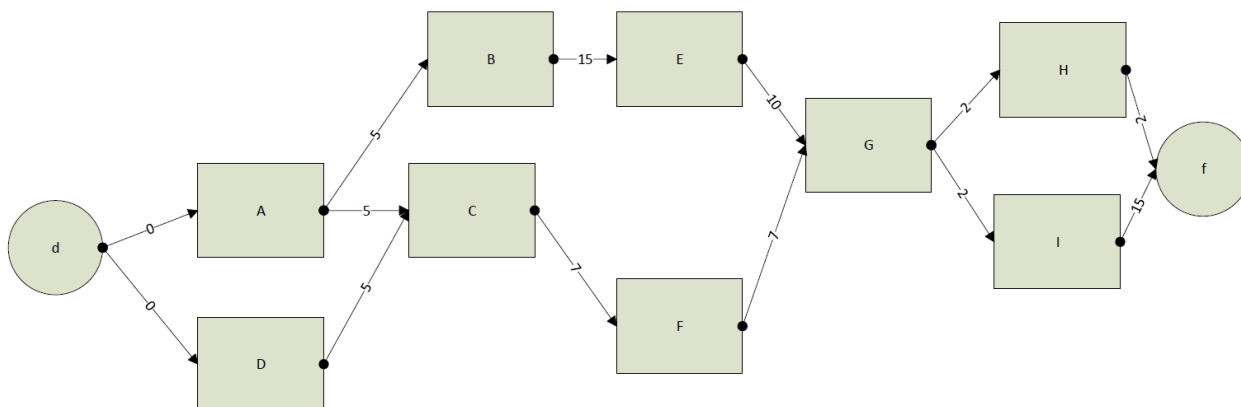


Figure 6: Le graphe de précedence

3. Calcul de dates au plus tôt de tâches

Tableau 2: Calcul de dates au plus tôt de tâche

Tâche	Calcul	Date au plus tôt
A		0
B	Max (0+5)	5
C	Max (0+5)	5
D	Max (5+15)	20
E	Max (5+7 ; 5+7)	13
F	Max (15+10 ; 7+6)	25
G	Max (2+10 ; 2+7)	12
H	Max (2+10 ; 2+7)	12
I		
f	Max (47 ; 36 ; 34 ; 23)	47

4. Calcul de date au plus tard

Tableau 3: Calcul des dates au plus tard du projet

Tâche	Calcul	Date au plus tard
A	Min (5-5)	0
B	Min (20-15)	5
C	Min (23-7)	16
D	Min (16-5)	11
E	Min (30-10)	20
F	Min (30-7)	23
G	Min (32-2 ; 45-2)	30
H	Min (47-2)	45
I	Min (47-15)	32
f		47

5. Calcul de la marge totale et libre des tâches

Tableau 4: Calcul de la marge totale et libre des tâches

Tâche	Date au plus tôt	Date au plus tard	Marge totale	Marge Libre
A	0	0	0	0
B	5	5	0	0
C	5	16	11	0
D	0	11	11	0
E	20	20	0	-5
F	13	23	10	5
G	25	30	5	-15
H	12	45	33	33
I	12	32	20	20

6. Interprétation des résultats

D'après les résultats des calculs des dates au plus tôt et plus tard des tâches (tableau 2 et 3), les tâches A, B et E ont les dates au plus tôt et au plus tard égales, elles sont donc des tâches critiques qui devront souffrir d'aucun retard au risque de retarder tout le projet dont la durée totale est de 47 jours. La figure suivante Figure 7, représente le graphe de normalisé avec une tâche fictive E' qui n'a aucune valeur afin de respecter la règle

d'antériorité et la figure 8 représente les tâches critiques avec le chemin partant de A à E dans le graphe normalisé.

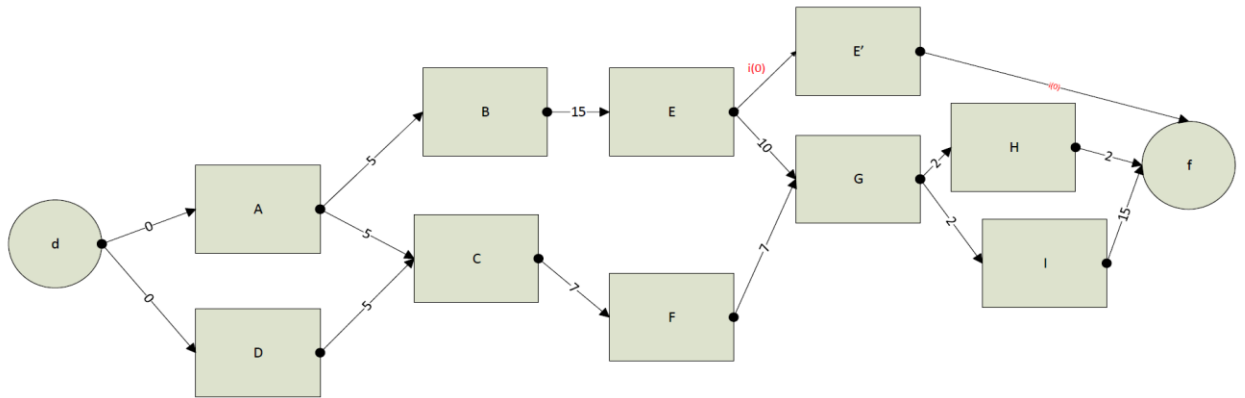


Figure 7: Graphe de précédence normalisée

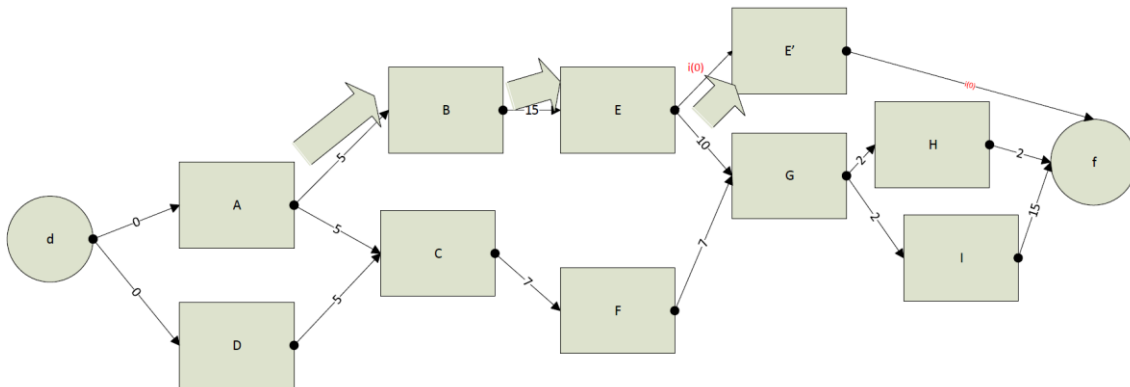


Figure 8: Identification des tâches critiques

Sur le tableau 4, les marges libres sont inférieures ou égales aux marges totales de tâches, les tâches ayant obtenues une valeur négative s'expliquent par le fait que le nombre de jours donné pour la réalisation de ces tâches n'est pas suffisant avant la contrainte. Pour le gestionnaire il faudrait attribuer un délai plus long aux tâches que celui choisi dans cet exemple.

3.9.3 Pour la phase opérationnelle

Selon l'échéancier la mise en service de la turbine était prévue pour septembre 2014. L'exploitation de la turbine est prévue jusqu'en 2034 environ 20 ans après la mise en service. Au début de la mise en service il était difficile d'intégrer la puissance éolienne dans le réseau à cause de la fluctuation du vent, le contrôle difficile à gérer. On a dû ajouter des algorithmes. À partir de 31m/s on limite la puissance éolienne par sécurité d'opération. Avec le temps l'intégration du système s'est améliorée. En termes d'hierarchisation de priorité pour la mine Raglan la priorité première est le fonctionnement de la mine.

3.9.4 Pour le démantèlement

Les procédures proposées lors du démantèlement du parc pour assurer la remise en état maximale du site sont ;

- La récupération des composantes éoliennes pour fin de réutilisation ou de recyclage
- Les routes et fondations seront laissées en place

Ces travaux couvriront une période d'environ trois mois.

3.10 CONCLUSION

Le présent chapitre donne les lignes directrices dans la mise en place de la stratégie logistique dans les régions nordiques et ce, pour des projets de déploiement des ENR. Les éléments cités sont communs pour tout projet en région nordique et isolée ou encore ailleurs. La logistique en région nordique n'est pas nouvelle, elle a été mise en place depuis des décennies déjà. La nouveauté apportée se situe au niveau de l'exploitation des énergies renouvelables, cette nouvelle approche du point de vue de l'approvisionnement énergétique apporte un nouveau visage dans le paysage nordique habitué plus au diesel importé de l'extérieur. Cependant, cette nouveauté apporte également avec elle, nombre des défis à relever. Les principaux éléments cités dans ce chapitre sont des outils pour une mise en place de la logistique adaptée en fonction de l'application à laquelle elle sera destinée, des conditions d'exploitation, de l'emplacement ainsi que des données antérieures qui serviront de base pour des applications futures. L'étude de cas de la mine Raglan est un exemple d'application pour ce type de projet, la marge libre négative est un cas qui peut arriver vu les conditions de réalisation du projet ; l'arrêt des travaux pour un vent fort au-delà de 25 km/ h fait partie des éléments à considérer dans la planification du projet.

CHAPITRE 4

EXPLOITATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN RÉGIONS NORDIQUES ISOLÉES : CAS DE L'ÉOLIEN ET DU PHOTOVOLTAÏQUE

4.1 INTRODUCTION

Dans cette partie nous allons explorer les éléments à considérer dans le cadre de la mise en place d'un projet d'énergies renouvelables dans un contexte d'extrême basse température. Cette mise en place aura pour but d'assurer l'efficacité du projet, la fiabilité et la durabilité du projet en parcourant toutes les contraintes possibles qui pourraient porter préjudice au bon déroulement et à l'exploitation du projet.

4.2 CAS DE L'EOLIEN : EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE EN REGION NORDIQUE

Le marché éolien dans le monde se trouve principalement dans les régions tempérées, car les conditions atmosphériques dans ces régions y sont propices à un déploiement massif. Cependant, il existe un autre marché éolien situé en région froide qui suscite probablement peu d'intérêt, mais peut être tout aussi rentable. En effet, la plupart d'éoliennes installées dans le monde sont conçues pour un climat standard (15° C). Pour l'éolien, les régions froides font référence aux régions où les conditions climatiques d'exploitation de la turbine éolienne sont en dehors de la limite de conception du manufacturier[29]. Ce sont des régions où se manifestent les phénomènes de basses températures ou de glaces atmosphériques. La glace atmosphérique se produit quand la température ambiante est en dessous de 0°C. Des gouttelettes très froides gèlent au contact d'une surface solide. Ces phénomènes se produisent en hiver quand les chutes de température sont fréquentes[29].

Les éoliennes implantées dans ces conditions climatiques sont exposées à la rigueur du climat et nécessitent une attention particulière. Les régions froides et isolées ont certaines particularités, c'est qu'elles possèdent généralement un bon potentiel éolien et une faible densité de population, qui les rendent attractives pour le développement éolien[29].

Le déploiement de l'éolien dans les régions froides sembla lent. En 2001 sa capacité était de 3000 MW pendant qu'au même moment, la capacité mondiale installée est passée de 24 GW à 94 GW. Deux raisons peuvent justifier ce timide déploiement. En termes de rentabilité, les manufacturiers préfèrent plus des projets éoliens dans les régions à climat standard que ceux des régions froides, car ils nécessitent plus des technologies. Aussi, le manque d'informations sur les risques éventuels qu'induisent l'accumulation de la glace sur la turbine ou encore sur les températures basses n'a pas contribué au développement massif dans ce contexte climatique. Dès lors, le choix de l'éolien devra comporter sur tous les aspects de la fabrication, et les composantes de chaque partie doivent être choisies avec minutie (matériaux de fabrication résistant aux températures extrêmes).

4.2.1 Capacité installée et prévision éolienne en région froide

L'industrie éolienne a connu un développement rapide durant les dix dernières années. La prise de conscience sur les conséquences réelles du changement climatique est un des facteurs qui ont promu cette évolution en matière de diversification des sources d'énergie. Les connaissances acquises au début du développement éolien jusqu'à présent ont permis la naissance de nouvelles générations de turbines éoliennes avec des technologies améliorées. Bien que le développement éolien en région nordique ait connu une croissance lente, ces dernières années ont été innovatrices en matière de technologies éoliennes pour climat froid.

En début 2013, la capacité éolienne totale installée en région froide était 70 GW regroupant l'Europe, l'Amérique du Nord, l'Asie et la Scandinavie. Seule une petite portion

de ces turbines était conçue pour le climat froid. D'après les données du GWEC (global Wind energy Council), l'année 2014 était riche en développement éolien, car les capacités installées ont atteint la barre de 50 GW par an pour la première fois. Plus de 51GW de nouvelles capacités ont été installés en 2014 alors que dans les années passées la moyenne était de 35.6 GW par an. Le dernier record a été atteint en 2012 avec une capacité de 45 GW. L'apport du marché asiatique y est pour beaucoup, car depuis 2005 l'évolution du marché chinois fut remarquable, détenant à lui seul le record en matière d'ENR installée dans le monde en 2014 [30]. À la fin de l'année 2014, la capacité mondiale éolienne a atteint le 369.6 GW pour une moyenne annuelle de 16% qui reste inférieure aux années 2005-2014 où elle était de 23% [30].

La capacité éolienne installée en région froide représentait approximativement 24 % du total mondial, soit 69 GW en 2013. Les prévisions pour l'horizon 2017 sont de 50GW de capacité en plus pour les régions nordiques qui représenteraient le cinquième de la production mondiale. Ceci est un indicatif réel de l'évolution que connaissent les régions nordiques pour le développement éolien. Au Québec les prévisions pour 2025, tablent sur une intégration de 8 GW en plus de l'énergie éolienne sur le réseau d'Hydro-Québec entre 2016 et 2025, au rythme de 800 MW de projet par année qui porterait à 20% la part de l'éolien dans le plan énergétique du Québec. En Chine, une capacité de 80 GW en plus est prévue dans les régions où les phénomènes liés aux climats froids se produisent(les régions montagneuses ou autres situées en haute altitude) [29-31].

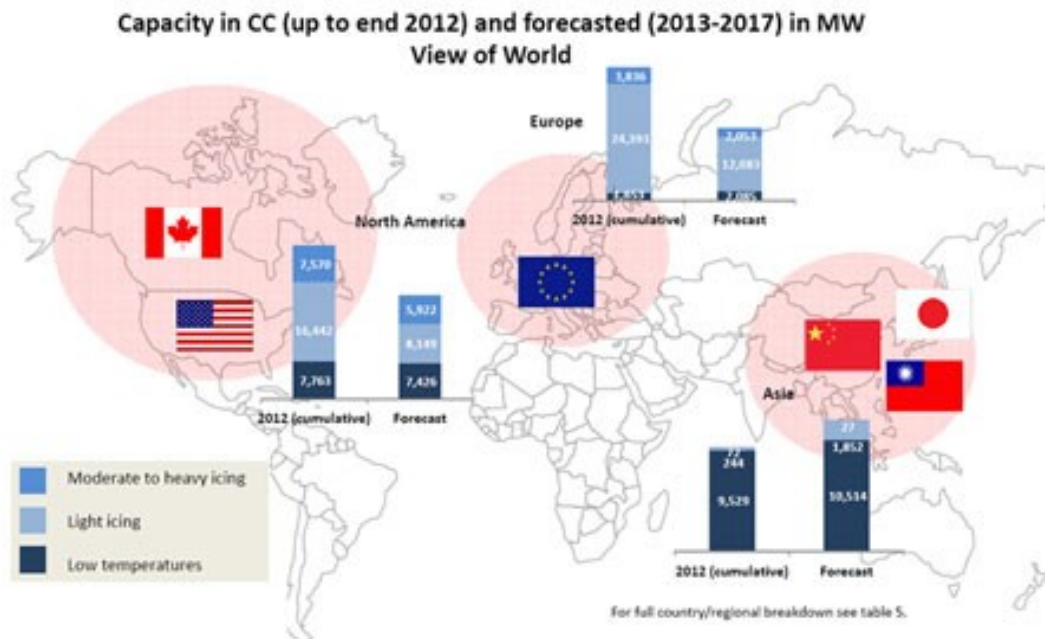


Figure 9: Capacité installée et prévision éolienne en climat froid [Source : BTW mise à jour du marché mondial 2012]

4.2.2 État de l'art

La problématique majeure dans un climat standard est de s'assurer que le site d'implantation possède un bon potentiel éolien afin que le projet soit économiquement viable et ce, après toute étude faite sur la faisabilité du projet ainsi que l'empreinte sur l'environnemental l'acceptation sociale.

Les régions nordiques, bien qu'elles possèdent un potentiel éolien exploitable, les turbines doivent fonctionner dans des conditions climatiques difficiles. Pour ces raisons, l'agence internationale de l'énergie (AIE), dans son programme de développement de l'énergie éolienne, a mis en place un volet particulier de l'éolien nommé : « énergie éolienne en climat froid » (*Wind energy in cold climate*).

Un groupe d'étude a été créé en 2001 afin d'exposer sur la problématique entourant le développement de l'éolien en climat froid nommé la Tâche 19(Task 19).

Le groupe commença ses activités en 2002, une collaboration internationale de pays membres de l'AIE. Les principaux objectifs de cette collaboration étaient de :

- Posséder une meilleure compréhension de l'éolien dans le contexte des basses températures.
- Établir les catégories des sites selon les conditions atmosphériques, pour ensuite associer les technologies éoliennes adaptées.

Une fois que ces informations ont été recueillies, elles ont servi à donner les lignes directrices aux opérateurs et manufacturiers de l'éolien pour le climat froid.

Le document a été publié en 2003. Ont participé à ce groupe d'étude, le centre de recherche technique de la Finlande (Technical Research Center, VTT), les instituts FOI et FFA de la Suède, KjellerVindteknikk de la Norvège, RISO le laboratoire national du Danemark, le NREL des USA, ENCO de la Suisse, Ressources Naturelles du Canada. La version mise à jour de l'état de l'art de l'éolien en climat froid (state of art the Wind energy in cold climate) de 2003 a été publiée en 2010, reprenant les mêmes activités avec des nouvelles données obtenues à partir de différentes expériences de chaque pays membre de l'AIE et collaborateur du groupe d'étude du Task 19.

En août 2014, le rapport annuel 2013 de l'AIE a été publié dans son chapitre sur l'éolien en climat froid. Les objectifs poursuivis étaient :

- De déterminer les solutions existantes pour l'éolien en climat froid, particulièrement sur le dégivrage et l'antigivrage.
- Revoir les standards existants, les recommandations pour le climat froid, et identifier les possibles mises à jour.

- Trouver et recommander des méthodes afin d'estimer l'impact du givre sur la production éolienne.
- Spécifier le concept de surcharge qu'impose la formation du givre sur les pales d'éoliennes.
- Mettre en place un marché éolien pour le climat froid (ferme éolienne, site isolé, réseau connecté).
- Définir les limites de fonctionnement d'éoliennes standards.
- Mettre à jour le Task 19, rapport sur l'état de l'art de l'éolien en climat froid : rapport des experts sur les lignes directrices à appliquer aux fins d'exploitation des éoliennes implantées en climat froid.

Les pays qui ont participé au Task 19 en 2013 sont : l'Autriche, le Canada, la Chine, le Danemark, la Finlande, l'Allemagne, la Suède et la Suisse.

Le rapport de 2014 du Task 19 reprenait les mêmes objectifs que les années précédentes avec une révision de certains objectifs comme :

- De déterminer l'état des solutions sur le fonctionnement des turbines en climat froid, spécialement le dégivrage et l'antigivrage, actuellement disponibles ou qui viennent d'être mises sur le marché.
- De créer un nouveau rapport du Task 19 sur les technologies disponibles et la mise à jour de l'étude des experts sur la démarche à suivre sur l'exploitation d'éoliennes en climat froid.

En 2014 le rapport du Task19 faisant l'état de l'art du rapport de 2013, sera renommé : *technologie adaptée pour l'éolien en climat froid* afin de spécifier la différence avec *le rapport sur les pratiques recommandées* de 2013 sur le projet d'énergie éolienne. Ces deux spécifications ont pour but d'atteindre deux publics spécifiques. La première vise

les opérateurs en développement éolien et les investisseurs, la seconde vise les ingénieurs et les chercheurs. La mise à jour des recommandations pratiques avait deux objectifs majeurs :

- Établir les lignes directrices afin d'atténuer les risques de projections du givre
- Mettre en place une méthode de standardisation, sur les pertes liées au givrage en utilisant uniquement le système de supervision de contrôle et d'acquisition des données (SCADA)

En 2015 les objectifs poursuivis étaient :

- La mise à jour de pratiques recommandées avec vérification des recommandations spécialement sur la classification de sites à climat froid, les méthodes d'estimation sur le rendement énergétique, les recommandations sur la santé et la sécurité dans les conditions de givrage en fonction des risques de projection du givre.
- Finir le rapport sur les technologies disponibles pour l'éolien en climat froid.

4.2.3 Classification de sites à climat froid

Les données locales sur les phénomènes atmosphériques sur un site sont indispensables afin d'évaluer les potentiels risques. Ceux-ci donnent une première impression sur la fréquence et la sévérité des conditions atmosphériques. C'est à dire précisent si le site est sujet aux basses températures, aux glaces atmosphériques, ou si les deux phénomènes coexistent.

Les données météorologiques, elles, sont une source d'information indispensable afin de déterminer la nature du site. Certains sites sont exposés aux basses températures avec un climat sec. Il n'y a donc pas de formation de givre. Les sites exposés aux basses températures sont des sites où les données des stations météo ont montré un minimum de

température en dessous de -20°C , sur une moyenne de jours de l'année supérieure à 9 jours. La moyenne de la température ambiante de l'air est en dessous de 0°C . Le site où il y a la glace atmosphérique est considéré comme un site où l'environnement est glacial, sujet aux fortes tempêtes de neige et aux extrêmes basses températures.

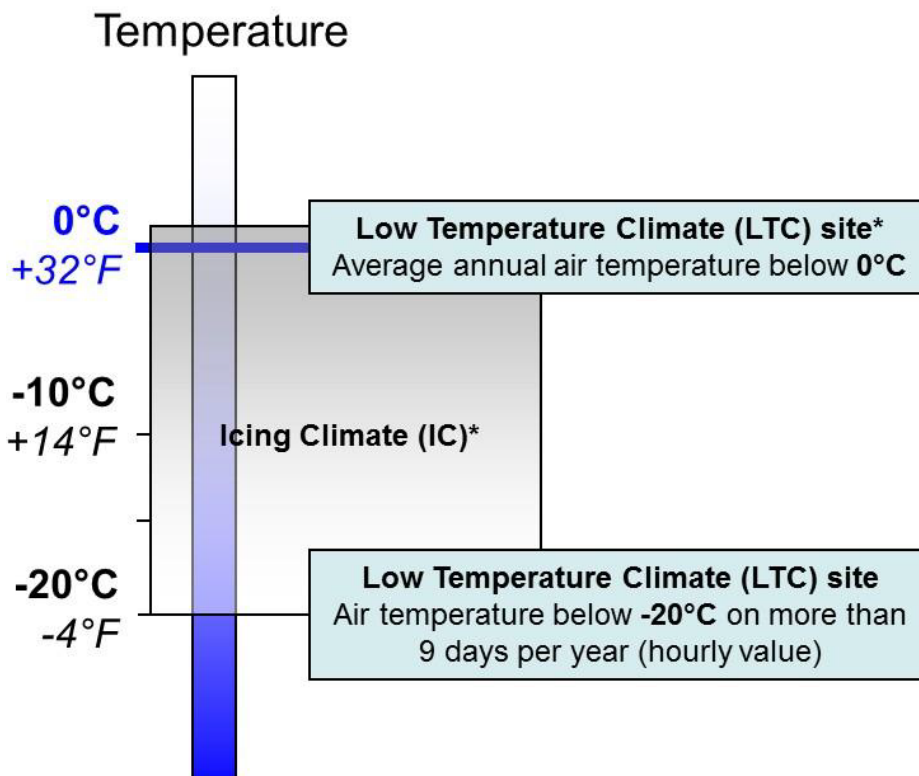


Figure 10: Climat glacial et à température basse en fonction de la température ambiante

Pour l'éolien, la glace atmosphérique est un concept qui devrait déterminer le niveau de sévérité de l'accumulation de la glace en fonction de la température et du facteur vent. Elle est définie comme étant l'accumulation de glace sur une surface exposée à l'atmosphère. La neige, la pluie verglaçante, la glace, le givre ou encore les basses températures ont une conséquence sur le fonctionnement de la turbine et également sur son rendement. En fonction de la sévérité du climat et des conditions propres aux sites, on peut classer les sites selon les catégories suivantes[32] :

1. Sites aux conditions atmosphériques normales.
2. Sites à minces couches de glace
3. Sites à épaisses couches de glace
4. Sites à basse température.

Pour toutes ces catégories. On doit estimer :

- La perte de la production en raison de l'arrêt de la turbine (le nombre de jours sans production)
- La perte de production en raison du fonctionnement de la turbine couverte par une couche glace.
- La perte en raison des limites d'opérations des éoliennes standards.
- Les coûts d'investissement d'un système antigel de pales par rapport aux différents cas de pertes de productions

Les différents types de glaces sont fonction de la température ambiante, des paramètres locaux du site, du taux d'humidité de l'air, de la vitesse du vent, ainsi que de deux concepts suivants : LWC (liquide water content) ou la teneur en eau liquide, et du MVD (median volume diameter) qui est fonction de la taille de la gouttelette qui tombe du ciel, dont dépendent l'intensité et la durée de l'accumulation de la glace sur la turbine éolienne.

Les types glaces relatifs à la turbine éolienne sont :

- Le givre blanc ou opaque : se produit quand les gouttelettes tombant du ciel ont une température en dessous du point de congélation (0° c) et se solidifient au contact d'une surface solide (avec un MVD et LWC faibles)

- Le givre dur ou verglas : se produit pendant une pluie verglaçante. Le MVD et LWC sont assez élevés. Ces pluies verglaçantes se produisent quand l'air chaud en altitude fond les cristaux de neige en gouttelettes qui se gèlent avec de l'air froid proche du sol. La neige humide se produit quand les cristaux de glace contiennent des LWC assez élevées à une température comprise entre 0 et -3 °c. L'accumulation de neige humide gèle quand la température baisse.
- Le gel : Il se produit quand la vapeur d'eau se solidifie directement en contact avec une surface froide et lors de faibles vents.

Dans les régions froides se produit souvent un autre phénomène dit de sublimation, qui est le passage d'un corps de l'état solide à l'état gazeux sans passer par un état liquide [33].

Pour les surfaces exposées au givrage atmosphérique la formation du givre se fait par phases. On peut citer [33]:

- Le givrage météorologique : c'est la période pendant laquelle les conditions météorologiques sont propices à la formation du givre.
- Le givrage sur instruments : c'est la période pendant laquelle le givre se forme sur une structure ou un appareil, et qui en empêche le bon fonctionnement.
- Le temps d'incubation : C'est le temps compris entre le début du givrage météorologique et le début du givrage sur les appareils et instruments.
- Le temps de récupération : C'est le temps compris entre la fin du givrage météorologique et la fin du givrage sur instrument.

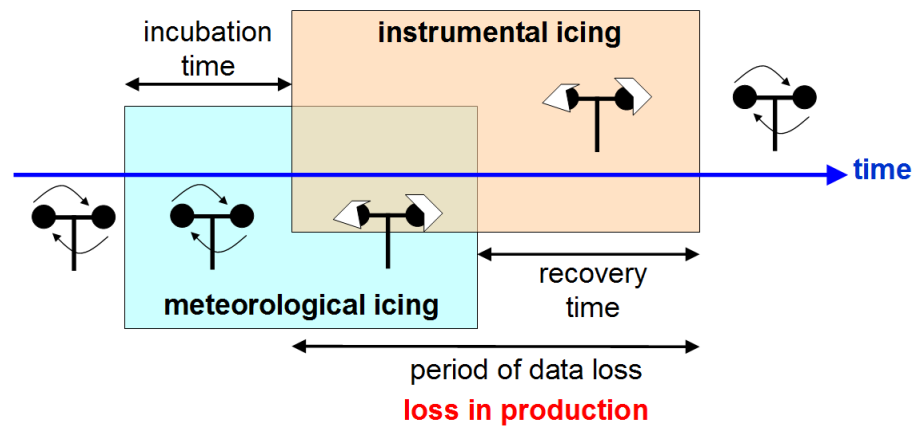


Figure 11: Définition du givrage météorologique et sur instrument [32]



Figure 12: Exemple d'effondrement d'une tour météorologique en raison du poids du givre[34]

D'autres paramètres peuvent aussi décrire le type de site :

- Le taux de givrage : C'est l'accumulation de la glace par heure [g/heure]
- La charge maximale de glace : C'est le maximum de glace accumulée sur une structure [kg/m]
- Le type de glace : le givre, le verglas, la neige humide.
- La densité de la glace détermine l'impact que l'accumulation de la glace aura sur la machine. Selon la norme ISO 12494, la densité du givre dur est comprise entre 600 et 900 kg/m³, celle du givre blanc est comprise entre 200 et 300 kg/m³ et celle de la neige humide accumulée est comprise entre 300 et 600 kg/m³. Le givre blanc est assez facile à enlever, mais le givre dur est beaucoup plus difficile à enlever. La neige humide est facile à enlever pendant la chute, mais devient difficile une fois qu'elle gèle.

Ainsi, on peut définir l'indice de performance qui est le rapport entre le givrage sur instrument et le givrage météorologique[33].

$$\text{Indice de performance} = \frac{\text{Givrage sur instrument}}{\text{Givrage météorologique}}$$

L'Agence Internationale de l'Énergie a classé les sites selon le degré de sévérité du givrage. Elle propose une version modifiée de celle élaborée lors du projet EUMETNET-SWS II qui, lui, aurait classé les sites en fonctions des stations météorologiques qui offraient une large gamme sur les fréquences du givrage. Les classes LII 4 et LII 5 de l'EUMETNET-SWS II sont des classes où il est impossible de développer un projet éolien. La version de l'AIE est fonction du givrage météorologique et du givrage sur instrument. Le tableau suivant montre la classification des sites selon l'AIE[34].

Tableau 5: Classe du givre selon l'AIE avec recommandation

IEA Ice class	Meteorological icing	Instrumental icing	Production loss
	% of year	% of year	% of annual production
5	>10	>20	> 20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0.5-3	1-9	0.5-5
1	0-0.5	<1.5	0 - 0.5

Notes : Lors de l'utilisation de la classe de givrage selon l'AIE il se peut que le site choisi corresponde à plus d'une classe de givrage dépendamment qu'il s'agisse du givrage météorologique, du givrage sur instrument ou encore de la perte de production utilisée comme entrée. Dans ce cas il est recommandé de choisir la classe au-dessus [34].

4.2.4 Contraintes liées au climat sur l'exploitation de l'éolien en région nordique

Le froid affecte directement la turbine au niveau de la production d'énergie et de la performance. Les conditions climatiques dans ces régions n'affectent non pas seulement la turbine elle-même, mais aussi tous les éléments entourant la logistique d'exploitation de la turbine (appareil de mesure, personnel de maintenance, capteurs, etc.). L'analyse de l'impact se fera sur toutes les phases d'exploitation de la turbine éolienne, tant du point de vue de la prédiction, de la production ainsi que de la maintenance :

- La prédiction : l'impact se fait sur les appareils de mesures, l'anémomètre et la girouette respectivement pour la mesure de la vitesse et de la direction du vent. La glace peut fausser l'estimation du potentiel éolien par exemple, une faible

accumulation de glace peut fausser la lecture de 30 % de la vitesse du vent de 10 m/s et une forte accumulation peut stopper l'anémomètre. Aussi, dans certaines situations il peut arriver que la turbine ne démarre qu'à vitesse élevée du vent si l'anémomètre est couvert de neige. Pour la girouette, il pourrait il y avoir une information faussée sur la direction du vent ou encore un désalignement qui pourrait stopper l'éolienne [33, 35].

➤ La production : elle concerne toutes les composantes de la turbine nécessaires à la production d'énergie.

- *La perte de production* : plusieurs aspects de la phase de production peuvent être affectés en raison de la charge en plus qu'induit l'accumulation de la glace sur la pale. Il en résulte une influence de deux types de charges ; une charge de fatigue et une charge extrême. La charge extrême est fonction de la structure même de la turbine et du taux d'accumulation de la glace. La charge de fatigue par contre est fonction de l'aérodynamique et de la masse de forces induites. En effet, l'aérodynamique des pales est sensible même à un léger changement du profil et de la rugosité de la pale. L'article publié par A.Bekhi et O.Geurri[36] présente l'influence de la rugosité sur le profil aérodynamique de la pale, car, dans la pratique la surface de la pale n'est souvent pas lisse et propre. Il y a toujours des impuretés qui ont pour conséquences de générer d'importantes variations sur les performances aérodynamiques. Les erreurs de lecture sur les appareils de mesure affectent aussi le système de contrôle de la puissance. La perte de la puissance est estimée de 0.005% à 50% de la puissance annuelle produite, dépendant de la durée et de l'intensité du givre sur le site[33, 35].
- *La surproduction* : elle survient, d'une part en rapport avec la densité de l'air élevée dans les zones à climat froid. En effet la densité de l'air est 27 % plus élevée à -33 ° C qu'à + 35 ° C. Comme la puissance produite par une éolienne est proportionnelle à la densité de l'air, dans ces régions la masse d'air peut

augmenter la production éolienne de plus de 20 % de sa puissance nominale. D'autre part, l'accumulation de la glace peut causer un retard de décrochage du contrôle à pas variable des éoliennes. Toute surproduction entraîne des dommages qui auront des effets sur la durée de vie des équipements [37].

- *Les huiles hydrauliques* : elles deviennent très visqueuses à très basse température. Le changement d'huile induit aussi celui de tout le système hydraulique (tube, valve et autres équipements associés). En raison de cette viscosité, l'éolienne ne démarre qu'à des vitesses élevées du vent afin d'améliorer la performance de la turbine entière[35] .
 - *Bris mécaniques* : l'accumulation de la glace augmente la charge sur les pales et sur toute la structure de la tour, causant ainsi une augmentation des vibrations, de la résonance, et aussi un déséquilibre entre les pales. La viscosité de l'huile dans les basses températures change les propriétés mécaniques des composants de la turbine. Cela entraînera une possible surchauffe et une charge de fatigue élevée sur les composants[33].
 - *Bris électriques* : L'infiltration de la neige et les températures extrêmes, causent la formation de la condensation dans l'électronique possiblement entraîner un court-circuit sur les composants électriques[33].
- La maintenance : la difficulté d'accès au site peut rendre la maintenance difficile à réaliser. Les conditions extrêmes ont tendance à prolonger la durée de maintenance. Un autre problème lié à la sécurité est causé par de possibles chutes de fragments glaces (0.18 à 0.36 kg). Le risque est plus élevé pour une éolienne en mouvement, car les fragments peuvent aller jusqu' à une surface de $1.5 \times$ la hauteur de la turbine plus le diamètre du rotor. Pour une éolienne au repos, la surface du risque est beaucoup moins large. Pour les deux cas, la direction du vent est un facteur important[33, 35].

4.2.5 Technologie adaptée pour les régions froides et recommandations

Les solutions techniques existent, pour remédier à ces problèmes d'exploitation de l'énergie éolienne en climat froid. Il faut tout d'abord connaître la nature du site et les phénomènes atmosphériques associés, ensuite savoir prédire les phénomènes de glaces (givre ou verglas, etc.), et enfin savoir détecter la présence de glace sur les équipements. Comme dit au point 4.2.4, les contraintes ou encore les conséquences du climat froid sur le fonctionnement de la turbine sont nombreuses. Afin de déterminer leurs impacts réels, la connaissance des phénomènes propres au site qui déterminent la nature réelle du site est primordiale. La figure suivante montre les conditions dans lesquelles les technologies éoliennes spécifiques au climat froid sont requises, selon le service industriel Germanischer Lloyd (GmbH), 2011 certifications de turbines pour les températures extrêmes [34].

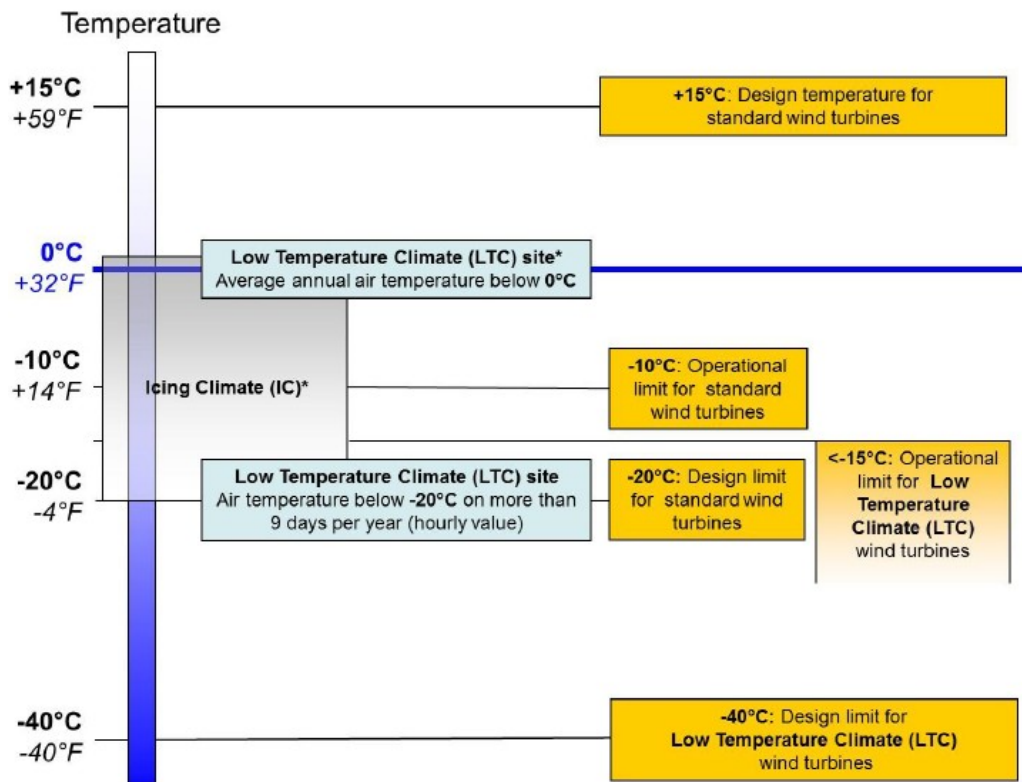


Figure 13: Climat glacial et à température basse en fonction de la température ambiante et de la conception de la turbine[34]

À l'instar de décider si le site est sujet aux températures basses ou non, l'IEA recommande la définition du service industriel Germanischer Lloyd sur les phénomènes propres au site. Le tableau suivant donne les valeurs pour les éoliennes standards selon Germanischer Lloyd et celle des turbines qui ont été modifiées. La norme standard IEC 60721-3-3 définit ces limites en fonction du climat pour les équipements électriques tels les transformateurs et commutateurs requis dans les fermes éoliennes.[34]

Tableau 6: Limite de température typique et recommandée pour la turbine

Limits	for standard turbines according to GL ¹	typical for LTC ² turbines
Operational temperature limits	-10 °C	-30 °C
Survival temperature (stand still)	-20 °C	-40 °C

I. Techniques de détection de la glace

Les équipements pour détecter la présence ou non de la glace doivent être maintenus chauffés et être adaptés pour la technologie éolienne en climat froid. La technique de détection de la glace peut se faire de plusieurs manières :

- Par observation : moyen facile pour détecter la présence de la glace sur une éolienne déjà installée. En observant les éléments aux alentours tels que les arbres, les lignes de transmission ou encore des fragments de glaces sur le sol autour de la turbine, on peut recueillir des informations cruciales sur la nature de la glace. Les dommages causés par le givre sur les lignes de transmissions donnent une information sur la sévérité et la durée du givre. Une caméra peut aussi être installée pour prendre des photos durant le givrage. Elles pourront ensuite être téléchargées via internet[38].



Figure 14: Indicateur de glace sur différents éléments aux alentours du site

- Par les bruits aérodynamiques : une petite accumulation de glace sur la pale d'éolienne augmente le bruit aérodynamique de manière significative, ce qui serait donc une information sur le changement du profil aérodynamique de la pale d'éolienne par un élément externe[38].

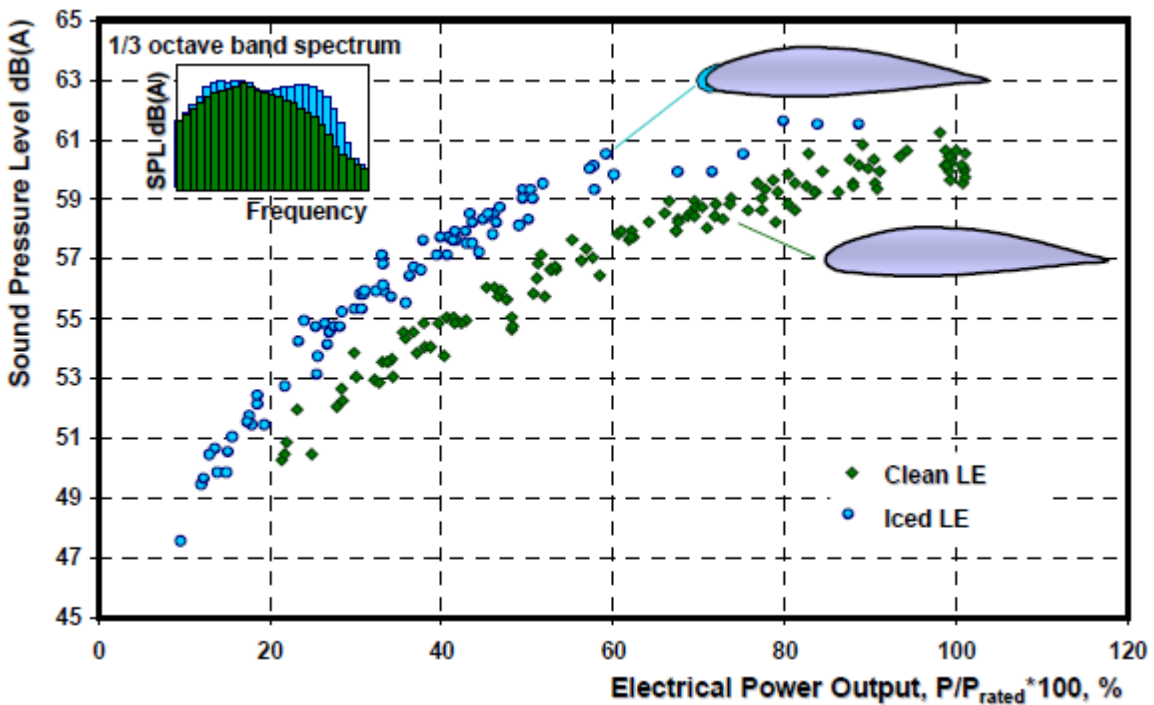


Figure 15: augmentation du niveau sonore lors de l'accumulation de la glace sur le bord d'attaque de la pale d'éolienne.

- Détection par capteurs de glace. : c'est une autre manière de faire plus simple avec les équipements adaptés. Les informations peuvent être reçues directement via un capteur de glace ou indirectement au travers d'autres instruments de mesure[38].



Figure 16: Capteur direct et indirect de glace

Il existe sur le marché des capteurs directs destinés pour l'aviation et les stations météo. Dans l'aviation, ils servent pour les calculs du poids et de la forme de l'accumulation de la glace sur les ailes de l'avion. Les codes pour l'aviation ont été modifiés afin de les adapter pour l'éolien. Les capteurs de glace sont les moyens les plus fiables pour détecter la présence de glace. Un de leurs principaux inconvénients est qu'ils sont placés à la hauteur de la nacelle. Or les effets de l'accumulation de la glace se font au niveau de pales. Des capteurs pour l'éolien 100% sans glace existent. Cependant, dans des conditions d'extrême froid, ils peuvent faillir[32, 38]. Les différents types de capteurs que l'on trouve sur le marché sont le capteur optique, piézo-électrique, et de fréquence[39].

- Le capteur optique émet la lumière à une photo capteur. L'interprétation de la lumière reçue par la photo capteur donne les résultats sur le taux de l'accumulation de la glace. Le fabricant atteste que le capteur peut différencier le givre du verglas.
- Le capteur de pale détecte le fonctionnement anormal des pales, du fait de la sensibilité de l'aérodynamique de la pale au moindre changement sur la surface (couche de glace), ou quand il y a un bris sur la pale.
- Le capteur piézo-électrique détecte le changement de fréquence lors des chutes ou tempêtes de neiges. Les tests sur ce type de capteur ont montré que pour des conditions extrêmes, la précision sur la présence ou non de la neige n'est toujours pas fiable.

La méthode indirecte quant à elle consiste à détecter la présence de la glace. On utilise deux anémomètres ou plus. L'écart de mesure entre les anémomètres justifie la présence ou non de la glace ou encore une autre combinaison d'autres données. Ainsi, la température ambiante, la vitesse du vent, la courbe de puissance de l'éolienne peuvent justifier la présence ou non de la neige[39].

- L'utilisation de trois anémomètres est un moyen peu coûteux de connaître l'état de la turbine lors des chutes de neige. Pour cela, on dispose de deux anémomètres chauffés et d'un autre non chauffé. Un des anémomètres chauffés sera gardé sans neige et l'autre sera chauffé quand l'écart entre les deux sera de 15%. Le troisième anémomètre sera lui gardé couvert de neige. L'expérience a montré qu'il était possible d'estimer l'accumulation de la glace sur l'éolienne par cette méthode[33].
- L'utilisation de deux anémomètres est une autre combinaison. L'un de deux sera gardé chauffé et l'autre non chauffé. Placés côte à côte, ils mesurent approximativement les mêmes vitesses du vent. Lors des chutes de neige, les deux anémomètres ont des lectures différentes. D'après les informations trouvées dans la littérature, une moyenne de 20% pour une vitesse de plus de 2m/s est requise . D'autres auteurs estiment qu'une différence de $\pm 5 \%$ est plus appropriée. Une

différence plus grande, par exemple de $\pm 10 \%$, n'est pas nécessaire puisque ne survenant que pendant une période courte par rapport à la quantité de glace accumulée vue par les cameras[33, 39].

- L'utilisation des données de l'anémomètre de la nacelle en plus la température ambiante : une analyse de performances de la vitesse du vent en fonction de la courbe de puissance ainsi qu' une déviation de la puissance de sortie de la courbe indiquent un fonctionnement sous conditions de glace pour des températures ambiantes en dessous de 0°C [39].

II. Techniques de dégivrage et d'antigivrage pour les pales

Le dégivrage et l'antigivrage sont deux techniques pour éviter que la glace ne s'accumule trop longtemps jusqu'à interrompre la production. L'antigivrage consiste lui à empêcher à ce que les pales ne soient couvertes de glace, tandis que le dégivrage est l'action de débarrasser les pales de la glace déjà accumulée. En fonction de la technique employée, le dégivrage ou l'antigivrage peut être passif ou actif. Pour les sites nordiques bénéficiant d'un bon ensoleillement pendant l'hiver, la glace peut se dissiper après la phase de givrage météorologique. Cependant, d'autres sites sont caractérisés par un taux d'ensoleillement faible. La glace peut rester longtemps sur les structures même après le givrage météorologique. Pour ces sites, le recours aux techniques de dégivrage ou d'antigivrage est indispensable [33].

1. Antigivrage et dégivrage thermique.

La solution thermique est une solution active afin d'atténuer les effets du givre sur la pale d'éolienne. C'est une technique qui reste très énergivore. L'intérêt d'un tel investissement doit être justifié en rapport avec le coût de l'électricité et de la perte engendrer par la présence de la glace sur la pale de l'éolienne. L'article [40] présente une revue de différents moyens utilisant les éléments chauffants.

L'antigivrage thermique : c'est un moyen pour prévenir la formation du givre en utilisant les éléments chauffants (résistances, couches d'air chaud, micro-ondes). Pour ce faire, la température de la pale doit être maintenue autour de 0 °C.

La température peut être maintenue à -5 °C au lieu de 0 °C. De cette manière, 33% de puissance sera économisée, ce qui représente 2,3% de la production pendant l'hiver. L'expérience suédoise sur le site d'Uljabuda a démontré que la consommation en énergie pour un système antigivre sur une turbine de 3 MW pouvait être de 0.5% de l'énergie annuelle produite. Ce système est très gourmand en énergie. Si la température de pale atteint le 100 °C. On est proche du point de ramollissement de plusieurs matériaux (époxy, résine). La température d'opération pour un tel système devrait être maintenue autour de 50 °C avec les matériaux connus. Cependant il y en a qui sont conçus pour des températures élevées.

- L'utilisation des micro-ondes : cela consiste à chauffer les matériaux des pales par les micro-ondes. L'objectif est de maintenir la surface de la pale autour de 0 °C dans le but de sauvegarder de l'énergie pour le dégivrage. Il est recommandé de couvrir les pales par une matière qui réfléchit les micro-ondes.
- L'air chaud : cette méthode consiste à créer une couche d'air chaud sur la surface de la pale. Cet air a été préalablement pompé dans la pale au préalable au travers de minuscules trous.

Le dégivrage thermique : c'est un moyen actif utilisé afin de débarrasser la pale du givre formé, en utilisant soit des résistances chauffantes, soit de l'air chaud.

- Les résistances chauffantes : elles sont placées à l'intérieur de la pale ou laminées sur la surface. L'idée est de créer une couche de film d'eau entre la pale et la glace. La force centrifuge créée lors du mouvement de rotation expulse les débris de glace. Un capteur de glace et de température est nécessaire dans ces conditions afin de contrôler le système de chauffage. Un autre capteur de température est requis pour éviter tout dommage lié au risque de surchauffe de la pale. Avec un tel système, on

estime à 5% la consommation de l'énergie par les éléments chauffants sur la totale de la production annuelle.

- De l'air chaud : il est pompé à l'intérieur de la pale. L'idée est toujours de créer un film d'eau. La force centrifuge expulse les morceaux de glace de la pale. L'efficacité est augmentée en utilisant un circuit fermé d'air chaud au lieu d'un circuit ouvert afin d'adapter la température de l'air en fonction de la température extérieure. C'est une autre façon d'augmenter l'efficacité en récupérant la chaleur produite par le moteur électrique dans la nacelle. Le test fait en Suisse sur une turbine Enercon de 850 KW montre un résultat avec 1 % de la puissance annuelle produite.

2. Autres Techniques actives

Parmi les techniques actives connues, on peut citer :

- Le dégivrage mécanique : c'est un système moins énergivore utilisé dans l'aviation. Un système pneumatique est employé sur les ailes d'avion. Lorsque l'accumulation de la glace atteint un certain nombre de millimètres, le système pneumatique gonfle et casse ainsi la glace formée. Cette application a été testée pour les pales d'éolienne. Ce système a l'avantage de ne pas consommer beaucoup d'énergie, par ailleurs, il peut déranger l'aérodynamique de la pale en augmentant la portée causant ainsi une augmentation du niveau sonore. Pour les 20 années d'exploitations de la turbine, ce système nécessite beaucoup d'entretien. Au final le système revient trop couteux[38, 40].
- L'impulsion électrique : ce système reprend les phénomènes de la création du champ électrique par la circulation du courant à travers une bobine. Celle-ci est placée proche de la surface des pales. Le résultat est un mouvement rapide au niveau de la surface et l'expulsion de la glace. Ce principe est repris par Hydro Québec pour ses lignes de transmissions aériennes[40].

3. Revêtement de la pale

Le revêtement de la pale est une solution passive pour empêcher la glace de s'accumuler en recouvrant la pale d'une membrane antigel, ou d'un matériel hydrophobe qui ne peuvent être mouillés. Les recherches sont menées en Suisse sur les propriétés que possèdent les poissons arctiques ne pas geler. Ces poissons possèdent une protéine antigel. Les polymères de synthèse imitent les comportements de cette protéine contenue dans les poissons. Ils sont caractérisés par deux particularités :

- 1) le point de congélation : l'eau gèle aux basses températures sur le revêtement.
- 2) le retard à la condensation : l'eau se condense aux basses températures.

Ainsi, une apparente baisse du point de congélation sur la surface du polymère est en réalité un retard de condensation sur la surface de la pale[35]. Les matériaux utilisés sont généralement de l'époxy, le polyester renforcé par les fibres de carbone ou de la fibre de verre.

S'agissant des sites où le givrage est léger, peu fréquent, et où les périodes de givrages sont suivies des températures au-dessus de 0 °C, ou encore les sites dont l'hiver possède un taux d'exposition au soleil élevé, une simple peinture noire sur la pale est suffisante. Cependant, il existe un risque de surchauffe de la pale durant l'été. L'avantage du recouvrement antigel est son faible coût. Pas besoin d'un système de protection anti-foudre spécial. La maintenance est aisée. Un simple recouvrement antigel évite des maintenances fréquentes. Il reste néanmoins une solution à court terme, car avec le temps, les propriétés antiadhésives du revêtement diminuent et en cas d'extrême givrage, la glace adhère. La solution serait une combinaison d'éléments chauffants et un revêtement antigel. Il en résultera une faible consommation d'énergie par rapport à un système chauffé seul.

Une solution de dégivrage passive serait une éolienne dont les pales du rotor sont assez flexibles pour casser la glace. Un autre système serait le tangage actif qui est un moyen connu pour orienter le rotor au soleil. Ce système fonctionne très bien pour un

givrage léger, mais pas pour le givre dur. C'est une méthode peu certaine qui peut causer des dommages à la turbine[35, 40].

Le tableau suivant présente un aperçu des technologies existantes d'antigivrage et de dégivrage de la turbine éolienne.

Tableau 7:Aperçu des technologies d'antigivrage et de dégivrage pour la turbine éolienne[34]

Turbine manufacturers offering anti- or de-icing	
Enercon – Rotor blade de-icing system	Warm-air circulation
Nordex – Anti-icing for rotor blades	Electro-thermal heating elements
Siemens – BDI (Blade De-Icing)	Electro-thermal heating elements
WinWinD – Blade Ice Prevention System	Electro-thermal heating elements
Independent system/solution providers	
EcoTEMP	Electro-thermal heating elements
Kelly Aerospace – Wind turbine ice protection system (WTIPS)	Electro-thermal heating elements
VTT Ice Prevention System	Electro-thermal heating elements

4.2.6 Utilisation des matériaux et lubrifiants pour basse température

Les matériaux de fabrications et les lubrifiants doivent être adaptés pour le climat froid. Très peu d'informations sont données à ce sujet. La plupart des données sont celles des rapports sur l'expérience des différents sites et en se basant sur, les manufacturiers ont fait une mise à jour de leurs différents matériaux. Cela n'augmente pas les coûts de fabrication de manière significative.

Une recommandation serait l'usage d'un acier résistant au froid sur toute la membrane structurelle. Les tests faits au centre national de la technologie éolienne (USA) sur la matière de fabrication de la pale d'éolienne à température ambiante et à extrême froid (-45° C à -50° C) concernaient l'acier 4140, le vinyle laminé avec un anneau d'époxy afin de les insérer dans la fibre de verre. Les résultats ont montré un prolongement de la durée de vie de ces matériaux à basse température. Ceci conclut que le climat froid n'a pas que des effets néfastes pour l'éolien, mais peut également contribuer à l'amélioration de sa performance.

Pour éviter le gel des huiles hydrauliques et des lubrifiants, ceux-ci doivent être adaptés pour le climat froid. Le câble standard ne convient pas au climat froid. On préconise un câble au Nylon 12. Pour les autres composants tels que les boîtes de vitesses, les systèmes de contrôles électroniques doivent être protégés du froid. Les boites de vitesses sont généralement chauffées afin d'éviter tout risque d'humidité ou de condensation, ce qui est fréquent en hiver sur les sites à températures basses[32, 35].

4.2.7 Normes existantes et exigence de l'éolien en région froide

L'exploitation éolienne en climat froid exige la connaissance des phénomènes qui se produisent sur le site. La mesure du taux de givrage est un facteur important qui permet de certifier une éolienne. Pour un site donné, la prédiction de la quantité de glace accumulée au repos et lors du fonctionnement doit être connue. Le standard considère l'accumulation de la glace de différentes manières. L'IEC 61400-1 (international electrotechnical commission) pour répondre aux exigences sécuritaires tient compte de la charge de la glace. Cependant, ni une charge maximale ni minimale n'est spécifiée. Germanischer Lloyd considère deux cas de givrages, l'une pour la partie tournante et l'autre pour la partie immobile de la turbine. Pour la partie tournante il existe aussi deux cas où on considère premièrement que toutes les pales sont couvertes de glace et deuxièmement les deux pales sont couvertes et que la troisième ne l'est pas. Pour la partie immobile, un minimum de 30 mm de glace sur toute la partie doit être considéré.

Une simple formule afin de calculer le concept de charge de la glace est donnée[35, 41]. L'agence danoise de l'énergie (Danish energy agency) donne des recommandations pour les éoliennes en mer (offshore). Les charges dynamiques provenant des océans glacés doivent être considérées. Aucune notification particulière n'a été faite de façon à estimer cette charge. Pour les parties en mouvement on se réfère aux recommandations de Germanischer Lloyd. L'Association canadienne de l'énergie éolienne a contacté GHC (Garrad Hassan Canada inc.) afin d'élaborer des consignes de sécurités en ce qui concerne l'éolien en climat froid.

Ces consignes concernaient les risques que posent les chutes des fragments de glace sur les personnels de maintenance ou sur les passants. GHC a publié une revue sur les bris de pales d'éoliennes. Dans cette publication, l'auteur a fait l'analyse du risque de chute provenant de la turbine et a conclu avec les éléments suivants : l'expérience et les calculs ont démontré que lors du fonctionnement de l'éolienne couvert de glace, la surface de

risque est beaucoup plus large. Pour l'éolienne au repos, les petits morceaux peuvent tomber de la turbine et la surface du risque est beaucoup moins large.

Dans les deux cas la direction du vent est un facteur important dans l'évaluation d'un possible risque et aussi dans le comportement du système de contrôle pendant le givrage.

4.3 CAS DU PHOTOVOLTAÏQUE : EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE EN RÉGION NORDIQUE ET ISOLÉE

4.3.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) transforment l'énergie lumineuse directement reçue en électricité. Cette technologie est devenue attractive en raison de sa simplicité d'exploitation ne nécessitant pas une main-d'œuvre qualifiée pour l'entretien. Viables pour une vingtaine d'années, la flexibilité d'installation est un autre des atouts d'attractions. En cas de manque de surface d'installation sur le sol, elles peuvent être installées sur le toit d'une habitation, d'une école, d'un immeuble, d'un hôpital, etc.

Pour pouvoir produire une grande quantité d'énergie à grande échelle, elles nécessitent des grandes surfaces, car les panneaux PV pris seuls ont une faible production. Ceci qui pose un frein pour son déploiement à grande échelle. La faible production limite son application à petite et moyenne échelle.

Cependant, selon les experts, l'énergie solaire est à même de répondre au besoin de la planète. En effet l'énergie solaire reçue par la terre est en moyenne de 1367W/m^2 . En un an la terre aurait reçu 15. 541024 joules dont les 30% sont réfléchis et renvoyés dans l'espace, 23% sont utilisés par le cycle d'évaporation de l'eau et moins de 1% pour le cycle de carbone, vent et des courants. Le reste de l'énergie est absorbé par l'air, les continents, les océans, et est transformée en chaleur ce qui totalise plus de 62000 Gtep (giga tonnes équivalentes pétrole ,1 tep=1200KWh), soit plus 6000 fois la consommation mondiale

d'énergie primaire. La transformation de quelques dix millièmes de cette quantité permettrait d'assurer un développement durable [42].

La plupart des panneaux PV fonctionnent avec un convertisseur électronique DC/DC le maximum power point tracking (MPPT), permet aux cellules de fonctionner au point maximum de puissance indépendamment de la tension d'opération du circuit qui est fonction de la quantité d'énergie solaire émise [43]. Si l'on veut obtenir plus de tension, les panneaux devront être montés en série. Si on veut un courant important, les panneaux devront être montés en parallèle.

La température est un élément important. Les conditions normales de fonctionnement selon le standard sont de 1000 W/m^2 à 25°C . À basse température, les performances des cellules PV sont légèrement différentes par rapport à celles installées dans les régions chaudes. En effet, l'énergie absorbée par les cellules ne se transforme pas en totalité en électricité. La grande partie se transforme en chaleur et chauffe les cellules, ce qui a pour conséquence de réduire leur efficacité. Les basses températures changent les caractéristiques électriques des modules PV en améliorant la puissance de sortie.

Dans l'entendement populaire, les pays chauds ou les régions fortement ensoleillées auraient un très bon potentiel photovoltaïque. On peut considérer cela comme étant une demi-vérité. Il est vrai que les régions chaudes ou ensoleillées bénéficient d'une forte intensité lumineuse, mais les cellules fonctionnent à faible efficacité comme dit au paragraphe précédent. Et c'est l'inverse pour les régions froides. À titre d'exemple, une cellule PV générerait 10% de plus d'énergie à 0°C qu'à 25°C .

4.3.2 Application du système photovoltaïque en région isolée nordique

La particularité des régions nordiques fait du photovoltaïque un atout comme source d'énergie. Il peut être utilisé en application autonome, couplée à d'autres générateurs, ou encore pour d'autres applications, surtout pour les populations disséminées et éloignées les unes des autres, dans de vastes territoires. Les conditions hivernales restreignent plus l'utilisation du système PV qu'en été où la disponibilité de la ressource solaire est abondante. Son application en hiver est réduite en raison du faible taux d'éclairement de certaines régions nordiques. On peut citer certains éléments liés à certains types d'applications auxquels le système PV répond :

1. **La fiabilité :**

À l'exemple de station de télécommunication et de surveillance située sur des sites où la connexion au réseau principale est impossible pour cause d'éloignement, ou encore de l'inaccessibilité. Pour ces applications, un minimum de maintenance est requis afin d'éviter des coûts supplémentaires comme pour d'autres générateurs d'énergies qui demandent plus de maintenance. Les stations relais de communication constituent les principaux marchés du photovoltaïque en site isolé. Chacune de ces stations a besoin d'une source d'alimentation fiable. Ces stations sont parfois inaccessibles par voie routière. Le moyen le plus adapté est par hélicoptère. L'avantage du système PV par rapport aux GD et aux batteries rechargeables est que ces deux modes de production nécessitent beaucoup d'entretien, ce qui tend à augmenter le coût d'exploitation. Le fait que le système PV ne requiert que très peu d'entretien en fait un candidat idéal. Par contre, pour une station qui nécessite plus d'énergie, l'utilisation du système PV seul n'est pas suffisante. Un système hybride serait dès lors plus adapté [43].

2. La transportabilité

La disponibilité de la ressource solaire est un des facteurs importants qui a favorisé l'expansion de ce système de production qui peut être exploité partout. Ainsi, pour des applications à court terme, ou qui nécessitent des déplacements fréquents, le système PV est l'idéal. D'une part il est non polluant, et d'autre part, sa simplicité d'exploitation et sa fiabilité en font un système qui répond parfaitement aux besoins à court terme des certaines applications. On pourrait citer les montres solaires, les calculatrices, etc. [43].

Autres exemples, les gardes côtières canadiennes ont déployé près de 6000 bouées de navigation équipées des cellules PV. Ces bouées fonctionnent tout au long de l'année dans les côtes de l'atlantique et dans le pacifique. Cette solution à moindre coût répond parfaitement aux besoins de surveillance des gardes côtières canadiennes, ainsi que celles d'autres pays. Le système constitue aussi une source d'alimentation transportable pour les ordinateurs et autres dispositifs électroniques. En site isolé, les chercheurs ont souvent besoin d'avoir un accès fiable à une connexion électrique, et dans certains camps de recherche, le poids des dispositifs peut poser un réel problème [43].

3. La simplicité

Pour les habitations isolées où les sources d'alimentation complexes peuvent faillir et où les personnels de maintenance doivent venir de l'extérieur, il est plus judicieux d'opter pour un système dont le risque de bris est moindre, et dont la maintenance ne demande pas obligatoirement un personnel qualifié [43].

4. L'utilisation estivale de l'énergie

Certaines activités humaines sont associées à des périodes de l'année. Il peut s'agir des habitations telles que les chalets, cottages ou autres, qui ne sont occupées qu'en été, période de l'année où l'éclairage du soleil est abondant.

Autres choses à noter : pour les pays où les températures descendent fortement en hiver, la consommation de l'énergie est souvent associée aux besoins en chauffage qui

consomment près de trois quarts de la consommation totale de l'énergie. En été la consommation représente près du tiers de la consommation hivernale pour ces types d'habitations qui ne consomment que très peu d'énergie et, sur une période de l'année où les besoins énergétiques sont réduits le système PV est le moyen le plus économique d'exploitation [43].

5. L'utilisation d'une source intermittente

Pour des applications ne nécessitant pas une source d'alimentation continue, l'utilisation des cellules PV suffit à combler les besoins en énergie et même les batteries peuvent être éliminées du système. Le ventilateur et pompe correspondent à ces types d'application. Dans plusieurs communautés isolées en Arctique durant l'été, il est difficile de maintenir les habitations à un niveau de fraîcheur équivalent à la température externe. Installer un ventilateur standard requiert plus d'appareillages (thermostat, contrôleur, etc.). Plusieurs communautés ont trouvé plus simple et moins onéreux en installant un ventilateur directement raccordé à des modules PV. Pendant la journée, le grenier est réchauffé et le ventilateur s'active.

Les pompes alimentées par les modules PV sont largement utilisées en région tropicale et en région froide principalement dans les prairies canadiennes. Elles servent au pompage de l'eau pour le remplissage des abreuvoirs pour le bétail. La plupart de ces abreuvoirs sont éloignés du réseau électrique. Le système PV est une source d'alimentation peu coûteuse. L'eau ainsi pompée sera contenue dans des réservoirs qui font office d'un système de stockage [43].

6. L'environnement est sensible au bruit et à la pollution

Dans certains milieux, le bruit et la pollution sont indésirables, par exemple un parc protégé, ou encore un parc isolé. La pollution et le bruit qu'accompagne généralement l'exploitation de GD en fait un moyen à proscrire pour ce type d'environnement. Les modules PV sont une alternative au GD et à l'extension du réseau électrique [43].

7. La réduction de la consommation du fioul est requise

Pour les communautés isolées le coût de l'énergie revient exorbitant. La variabilité du coût du pétrole, et l'éloignement de ces régions sont tous des facteurs qui ont contribué au choix d'un autre système alternatif permettant de réduire le coût d'exploitation. À cause de l'hiver long et sombre, le système photovoltaïque ne pourra remplacer complètement le diesel. Cependant, dans le contexte de diversification de source d'alimentation il répond parfaitement au besoin estival, moment de l'année où la consommation d'énergie est réduite au tiers. À titre d'exemple, dans les territoires du N-O canadien, une installation de 20 MW correspond à 10 % de l'énergie totale [43].

8. La contribution des ENR dans le réseau électrique est requise

Dans la politique de réduction des effets des GES, certains pays veulent que la part des ENR soit de 20 % de la production électrique totale. Dans ce contexte, l'énergie produite par les cellules PV peut être directement injectée dans le réseau électrique [43].

4.3.3 Influence et contrainte du climat froid sur les cellules photovoltaïques

Les phénomènes présents en région froide affectent le fonctionnement des cellules PV. En effet de façon générale, ces cellules sont conçues pour des conditions de températures standard soit, 25°C ; en région froide, les températures descendent en dessous de zéro et atteignent souvent le point de congélation. Ce qui affecte la structure interne des matériaux de fabrication des cellules PV. Certains de ces phénomènes ont une influence positive. D'autres par contre influencent négativement les cellules PV. L'analyse de chaque phénomène donne un aperçu global de la situation.

1. Les températures basses

Quand les rayons solaires sont captés par les cellules PV, une partie de cette énergie est transformée en chaleur. Ceci a tendance à chauffer la cellule. Et en région chaude, la température ambiante augmente cet effet. D'où la nécessité de rafraîchir les cellules avec un système de refroidissement. En région froide, à températures basses les électrons sont moins agités. Ce qui a pour conséquence d'augmenter l'efficacité de la cellule. À titre d'exemple, la cellule au silicium cristalline produit 10% de plus d'électricité à 0°C qu'à 25°C pour un site exposé au même taux d'ensoleillement [43].

2. Faibles performances à un faible niveau de luminosité

En hiver les journées sont relativement courtes et nuageuses. Les cellules opérant dans ces conditions bénéficient d'un faible taux d'éclairage de l'ordre de 200 W/m² (les conditions normales sont de 1000 W/m²). Les cellules sont donc moins efficaces et génèrent moins de 20 % de la puissance générée à 1000W /m². Toutes les cellules n'étant pas fabriquées pareilles même si elles ont les mêmes performances sous les conditions normales, la figure suivante montre l'efficacité de trois modules en fonction de l'éclairage :

- La cellule A est une cellule typique dont les performances baissent à faible luminosité.
- La cellule B est représentative des cellules à faibles performances pour une faible luminosité.
- La cellule C présente de bonnes performances à faible luminosité.

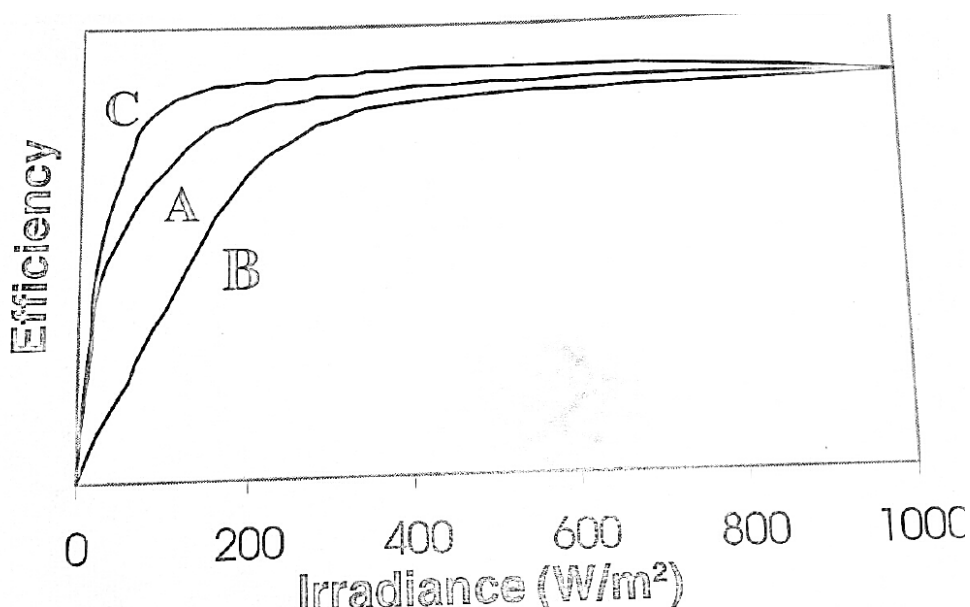


Figure 17: Comparaison de l'efficacité de la cellule PV à taux d'éclairage faible

Les cellules comme C sont relativement rares. Cependant avec l'évolution, de la technologie et le marché de régions froides qui tend à diversifier les sources d'alimentation, de plus en plus des modules de nouvelles générations fonctionnent très bien en région froide, pendant les périodes de faible luminosité en maximisant les rendements [43].

3. L'effet spectral

La lumière du soleil contient une gamme complète de couleurs. Durant l'hiver le soleil doit traverser une masse d'air plus importante qui a tendance à bloquer la lumière bleue. Du coup, le soleil devient beaucoup plus rouge. Les cellules sont sensibles à cet effet spectral de la lumière. Les cellules aux silicones cristallines sont faiblement sensibles, car elles sont influencées par une large gamme de longueurs d'onde de la lumière. Celles aux silicones amorphes et aux Telluride cadmium sont sensibles à une faible gamme de couleurs. En hiver, elles ont une faible performance comparée aux autres cellules qui présentent de meilleures performances en hiver [43].

4. L'accumulation du givre et de la neige sur les cellules

Lors de fortes chutes de neige suivies de baisse de température, la neige se solidifie et forme une couche épaisse de glace difficile à enlever. Cette dernière peut bloquer les rayons solaires, réduisant ainsi la puissance de sortie et dans certains cas peuvent même endommager la cellule. Certains types de givre forment un film transparent qui permet néanmoins au soleil de traverser la cellule. Cette lumière se transforme en chaleur, qui fondra le givre plus facilement. Les pertes occasionnées dépendent de la sévérité des phénomènes propres à chaque site. Elles peuvent être de l'ordre de 1 à 1.4 % annuellement pour les sites ensoleillés en hiver. D'autres sites atteignent jusqu'à 3.5 %. Vu ces chiffres, les pertes peuvent sembler négligeables, étant donné que les étés compensent le rendement annuel du système. Cependant, les mois de l'année qui demandent plus d'énergie sont les mois où le taux d'ensoleillement est faible. Ainsi, pour les applications en autonomie totale et pour des puissances élevées, le système PV n'est pas adapté. Pour les sites exposés au vent, on devra disposer des moyens externes pour ôter le givre opaque sur les cellules. Il a déjà été reporté une accumulation de 1 mètre de glace sur les cellules installées au mont Loser en Autriche. Le poids du givre avait endommagé les cellules [43].

5. Sur l'électronique

Les équipements électroniques nécessaires au fonctionnement des cellules PV sont affectés par le climat de différentes façons. On peut noter qu'il arrive qu'en hiver on rencontre deux situations : il fait froid et que le soleil brille. La combinaison de ces deux situations conduit une production de puissance supérieure celle produite dans des conditions standard de 1000 W/m^2 à 25° .

Ceci s'explique par le fait qu'à basse température, les performances de la cellule sont bonnes et qu'en même temps la cellule bénéficie d'une bonne irradiation. Au mont Loser en Autriche, on a noté avec la réflexion de la lumière sur le sol couvert de neige, un taux d'irradiation atteignant les 1200 W/m^2 avec une production de plus de 20 % que sous les conditions standards. Ainsi, le contrôleur de charge doit être adapté pour ce genre de

fluctuation de puissance et de courant. Le contrôleur de batterie doit être spécifié pour des courants jusqu' à 30% supérieur aux courants produits sous conditions normales. Les contrôleurs du MPPT doivent disposer d'un large facteur de sécurité. Pour les convertisseurs, ces fluctuations ne sont pas pertinentes en ce qui concerne les dimensionnements. Ces composants sont aussi affectés par les chutes de température et les condensations occasionnées par le froid en contact avec les températures plus élevées de ces dispositifs électroniques. On peut noter des courts circuits ou encore le blocage de certains relais électroniques. La solution est de maintenir les dispositifs dans un endroit sec [43].

4.3.4 Capteurs d'éclairage en région froide

Le taux d'éclairage d'un site quelle que soit sa localisation est un élément important. De celui-ci dépendra la viabilité du projet. Il existe trois principaux types de capteurs :

- Pyranomètre thermophile : il mesure le taux d'éclairage en comparant la température ambiante et celle d'une surface exposée aux rayonnements solaires. Cette surface est protégée du vent et d'autres éléments pouvant fausser la lecture [43].
- Cellule de référence : elle est contenue dans le kit de modules PV. Elle a une particularité, celle de produire un courant qui est fonction du nombre et de la distribution spectrale de photons. Ce courant est mesuré par la tension aux bornes d'une petite résistante montées sur la cellule [44].
- Photodiodes : elle est sensible à la lumière [43].

Les différents équipements doivent être protégés de la neige et du givre en ajustant l'angle d'inclinaison de manière à minimiser l'accumulation. Pour plus de précision dans les mesures durant l'hiver la ventilation ou le chauffage des capteurs est nécessaire [43].

4.3.5 Techniques passives de dégivrage des cellules photovoltaïques

Pour les sites sujets au givrage léger, différentes techniques existent afin de maintenir les cellules sans glace. Parmi elles, on peut citer les plus connues :

- **L'augmentation de l'angle d'inclinaison des cellules :**

Sous l'effet de la gravité, la neige accumulée glisse. On préconise un minimum de 45°. Et pour des sites sujets à des fortes chutes de neige, 60° est plus recommandé [43].

- **L'assemblage des cellules rectangulaires parallèlement orientées sur la largeur :**

En effet les cellules de petites dimensions ont tendance à retenir la neige. Sur celles de grandes dimensions par contre, le poids de la neige au-dessus a tendance à faire glisser le reste dans le sens de la gravité. D'où la nécessité de les orienter parallèlement dans le sens de la longueur afin de créer un système de poids situé à l'extrémité opposée du sol, à une certaine hauteur [43].

- **Éviter d'installer les cellules face au vent :**

Pour les sites sujets au givrage afin d'empêcher le givre de se former sur les cellules, il est important de connaître la direction du vent sur le site. Éviter d'installer les cellules dans un couloir de passage du vent qui transporte souvent les gouttelettes glacées qui, au contact d'une surface solide, gèlent [43].

- **Utiliser la diode by-pass :**

L'ombrage partiel a une conséquence électrique sur la cellule PV. En effet, quand la cellule est partiellement couverte, le courant produit par la partie non couverte a tendance à traverser toute la cellule. La partie couverte se comporte dès lors comme un récepteur, car le courant ne pouvant pas y circuler, la puissance est dissipée sous forme de chaleur

pouvant atteindre jusqu'à 100°C. C'est le phénomène dit de *hot spot* qui a pour conséquence d'accélérer le vieillissement de la cellule, dans le pire de cas la grillé. Pour y remédier, on place des diodes by-pass, une à deux selon le constructeur. Elles permettent de limiter la tension aux bornes de la cellule couverte, devenant ainsi passante. Elles transfèrent le courant sur la série suivante. La diode by-pass limite ainsi les pertes de puissance [43, 45].

- **Manuellement :**

Dans certains cas moins extrêmes où la neige peut être enlevée manuellement, il est possible d'employer des moyens plus simples pour maintenir les cellules non couvertes lors de l'entretien, chaque chute de neige pouvant occasionner un arrêt de production [43].

4.3.6 Techniques actives de dégivrage de cellules photovoltaïques

D'autres techniques employées afin de maintenir les cellules non couvertes vont dépendre de l'apport du système pendant la période hivernale. Le coût de la technologie employée sera justifié par les objectifs visés de maximisation de la productivité. Une des méthodes consiste à inverser le sens de circulation du courant électrique à travers la cellule, ce qui a pour conséquence de chauffer la cellule. Ainsi, la glace fond facilement. Cette méthode reste très énergivore. Elle demande l'équivalent de trois heures d'énergie produite par une cellule dans les conditions normales. Une autre méthode, elle, consiste à empêcher la glace de se former sur la cellule. La cellule est couverte d'un revêtement antiadhésif qui empêche la glace de geler sur la cellule. Un brevet a été déposé en 2013 par *R.M. Reedy et So.* sur une nouvelle génération cellule PV intégrant des éléments thermoélectriques. Cette cellule a la particularité de fonctionner comme un régulateur thermique afin de maintenir la cellule dans les conditions normales de fonctionnement en termes de température. La méthode utilisant la chaleur pour fondre la glace est aussi utilisée. La chaleur est fournie par une source extérieure au travers d'un système de chauffage de la cellule jusqu'à atteindre 0°C [43].

4.3.7 Exemple d'exploitation du système photovoltaïque en site isolé nordique

Plusieurs sites en régions nordiques ont déjà expérimenté, le système PV dans des pays comme la Suède, le Canada, les États-Unis, etc. Les exemples suivants démontrent la faisabilité du système dans des conditions climatiques extrêmes, comme le cas du collège arctique de Nunavut et de Fort Simpson dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada.

1. COLLÈGE ARCTIQUE AU NUNAVUT

- **LOCALISATION**

Le collège arctique est situé à Iqaluit dans les Territoires du Nord-Ouest au nord du Canada à 40 m d'altitude et de latitude 63.8° N 68.5 ° O.

- **LE PROJET PHOTOVOLTAÏQUE**

En juillet 1995, un système PV a été installé sur la façade sud du collège arctique au campus de Nunatta. Le système d'une capacité de 3.2 KW est directement connecté au réseau local alimenté principalement par le diesel. Les principaux objectifs poursuivis par le projet étaient : d'acquérir de l'expérience dans l'installation, le contrôle et la maintenance d'un système de production PV en climat froid ensuite de servir de modèle pour les futurs projets en climat extrême [43, 46].



Figure 18: Façade du collège

- DESCRIPTION DU PROJET
 - Capacité installée 3.2 KW constituée de 60 modules montés en parallèle par groupe de 5 composés de 12 modules en série.
 - Type de cellule : un groupe composé de 36 cellules à la silicone cristalline Siemens M55, 2 groupes de 24 S-53 cristallins Solec
 - Superficie : 25.62 m²
 - Emplacement : vertical à 30° O du Sud
 - Équipement électronique : le système est connecté à un onduleur prosine 5000GT 3-KW

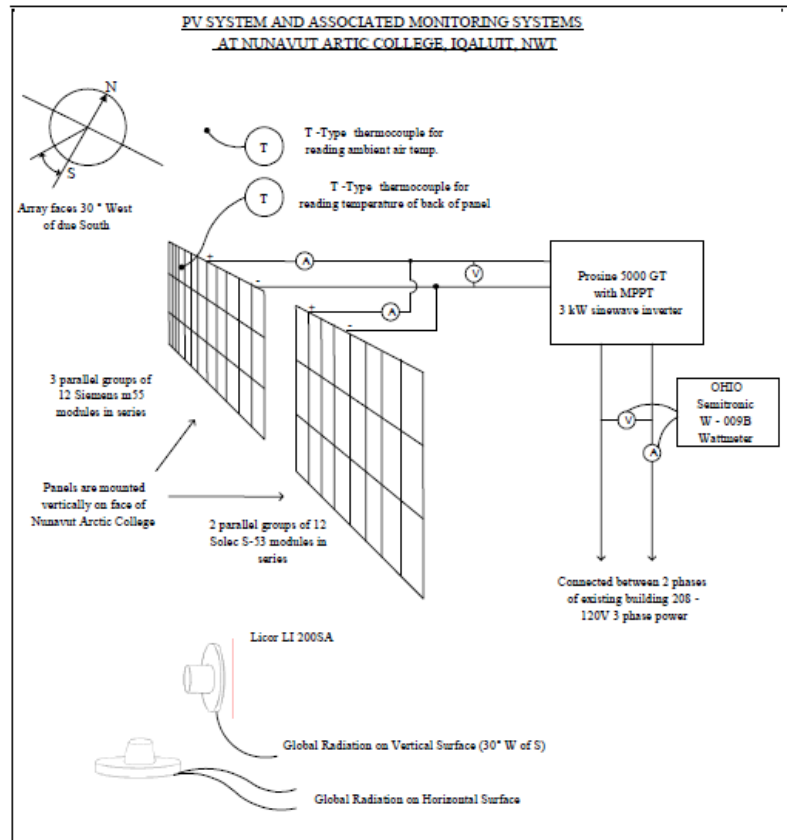


Figure 19:Description du système[46]

- PERFORMANCE DU SYSTÈME

L'article publié en 2004 faisait l'analyse de performance du système, en survolant toutes ses composantes [46].

- Performances des modules PV : les performances du système sont fonction des conditions climatiques. En hiver, la production est très faible environ 13.2 kWh au mois de décembre. En avril elle peut atteindre 471 kWh. L'analyse annuelle de 1995 à 2003 montre une production constante de 2.600 ± 200 KW. Un maximum de 12.5 % de rayonnement a été atteint au mois de février, mars et avril pour un

minimum de 6 à 8 % en décembre. Il faut noter que ce maximum d'efficacité correspond à la période de l'année où les conditions sont favorables pour les modules fonctionnant en climat froid, quand les températures sont basses et que le site dispose d'un bon rayonnement. Cette combinaison permet à la cellule d'atteindre des performances élevées. Cette efficacité est moyenne de juin à novembre le taux d'éclairement est bon, mais les températures sont beaucoup plus chaudes. Pour les deux types de cellules installées il a été noté une légère différence, le rendement des cellules solec est de 2 à 3 % inférieur à celui des cellules siemens durant 1995-2003

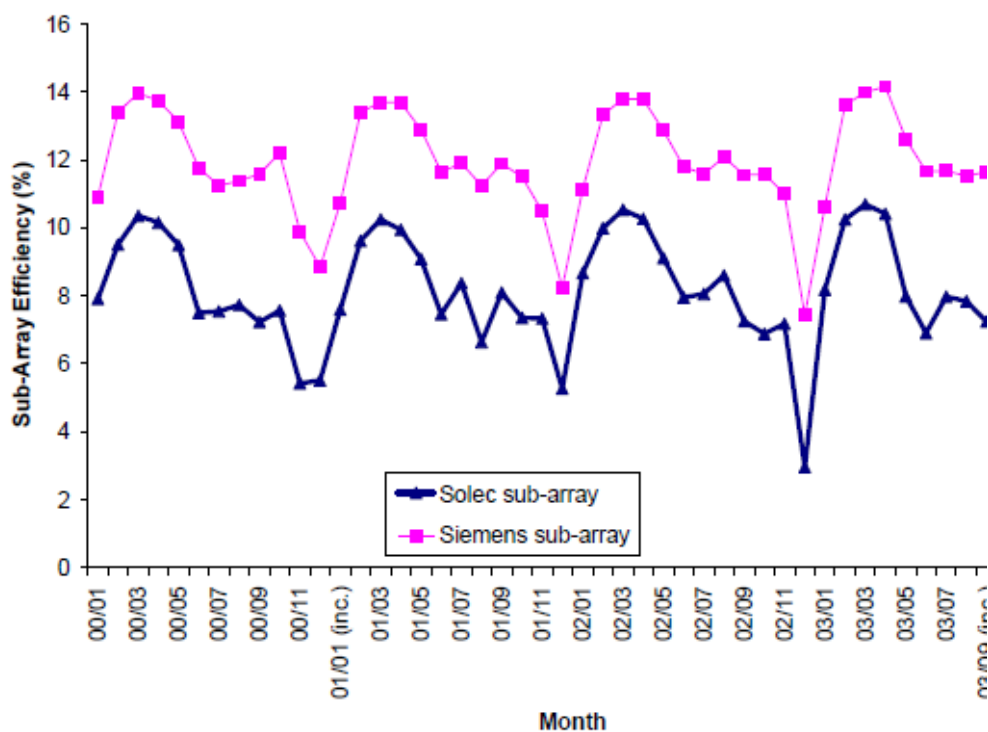


Figure 20: Efficacité des cellules Solec et Siemens[46].

- Performances des onduleurs : les performances des convertisseurs DC-AC sont notées d'après la figure suivante. On remarque une chute de performances pour des puissances en dessous de 1000W et l'efficacité maximum est proche de 90% pour des puissances élevées. L'onduleur a été conçu pour fonctionner à un certain point optimal. Pendant l'hiver, l'onduleur fonctionne durant une longue période avec moins de 100 W produits par les modules. Ceci explique la faible performance pendant cette période, en l'occurrence au mois de décembre. D'une façon générale, la fiabilité du convertisseur prosine 5000 GT a été exceptionnelle avec peu de cas de bris. Il a été conçu pour fonctionner pendant 5 ans et aucun bris n'a été noté durant les 9 années [46].

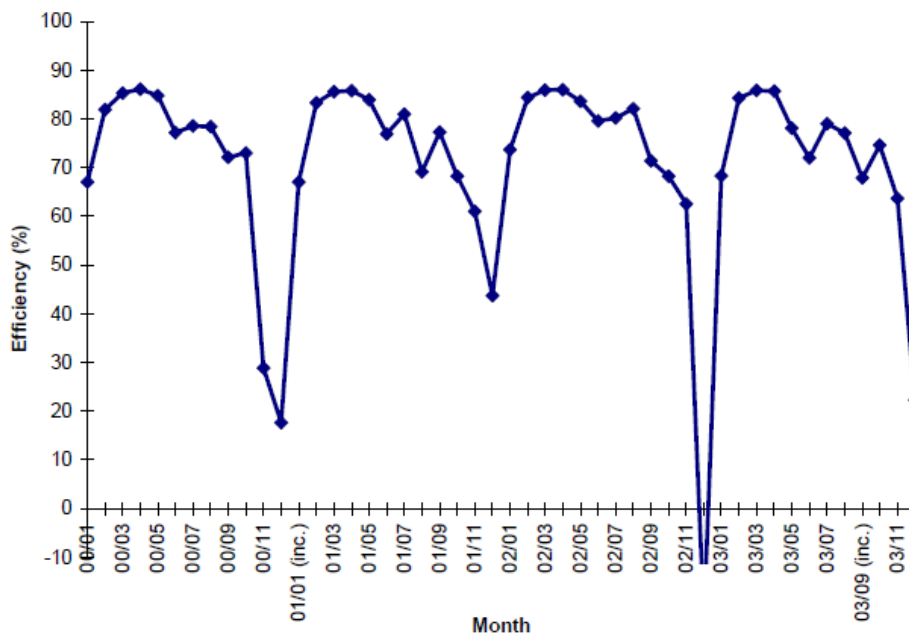


Figure 21: Efficacité mensuelle de l'onduleur [46]

- Performances du système : l'analyse a été effectuée durant les 9 premières années d'exploitation du système. Durant cette période, la production annuelle du système variait entre 1813 et 2210kWh, le rendement en puissance, lui, était de 567 et 691 KWh/ KWp avec une ration de 0.70. L'année 2003 correspondait à l'année où la production était faible.

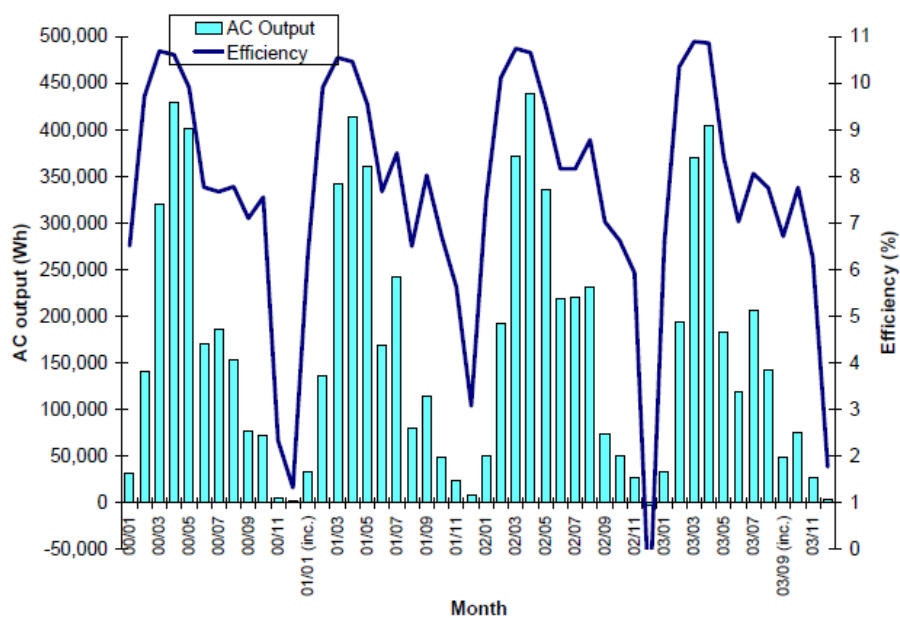


Figure 22: Efficacité et rendement mensuel des cellules PV

- CONCLUSION

Le résultat de neuf années d'exploitation a été concluant. En termes de fiabilité, le système aura produit une moyenne 2.016 ± 200 kWh par année, et ce, sans interruption. Après vingt années d'exploitation, les 60 modules ont produit 70 à 75 % de leurs capacités. Avec des cellules de nouvelles générations, le rendement aurait été encore meilleur. En 2014, le système de contrôle a été remplacé. Avec un nouveau calibrage des équipements, les données de la campagne de surveillance de novembre 2014 ont montré que le système continuerait à produire, d'après les prévisions même 20 ans plus tard et sans interventions de maintenances.

2. FORT SIMPSON

- LOCALISATION

Fort Simpson est un village des Territoires du Nord-Ouest canadien, situé sur une île au confluent du fleuve Mackenzie et de la rivière Liard.

- PROJET PHOTOVOLTAÏQUE

L'installation d'un système d'exploitation solaire sur un territoire situé sur 60° parallèle au nord du Canada. Un réseau de 104 KW est une compensation de l'exploitation du diesel importé de l'extérieur. Le projet a été complété en deux phases : une première installée en janvier 2012, d'une capacité 60 KW suivie d'une extension de 43.4 KW en février 2013. Le projet présenta plusieurs défis. Il a fallu attendre l'hiver pour l'installer, car les routes étaient inaccessibles durant la majeure partie de l'année (pont de glace et traversier). Il a été installé 436 panneaux de 91 m de longueur et 4.2 m de large élevés de 3 mètres du sol. Le projet a été principalement financé par le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest à 90 % ,et le reste a été pris en charge par le NTPW (Northwest Territories Power Corporation) [47]



Figure 23: Champ photovoltaïque[47]

- L'APPORT DU PROJET

Le système permet d'alimenter 17 foyers. Il peut produire jusqu'à 100 KW lors des journées ensoleillées, et permet également une réduction des GES de 76 tonnes annuellement pour une économie (annuelle) de 27.900 litres de diesel [47, 48].

- COMPARAISON DE DEUX ANNÉES D'EXPLOITATION

- L'année 2013 avec 109 MWh (1046 kWh) [26]

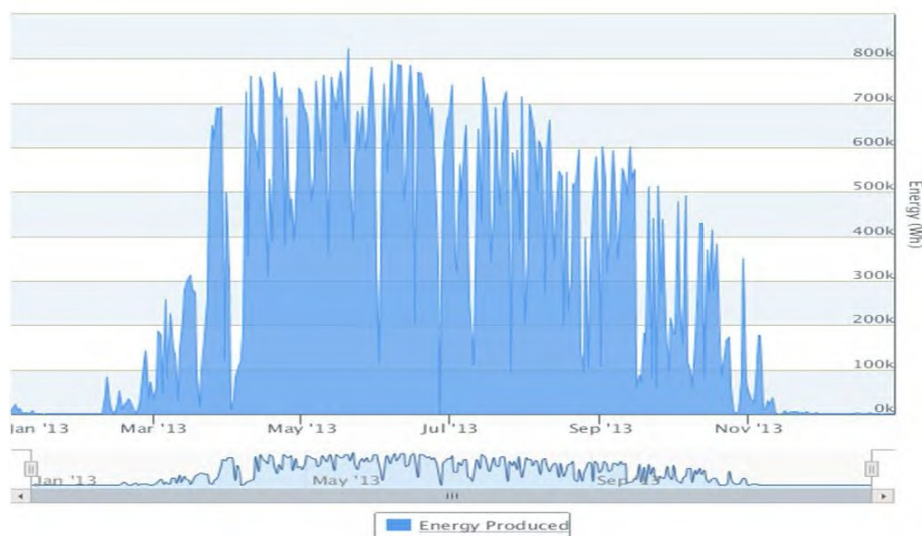


Figure 24: Production des cellules PV pour l'année 2013

- L'année 2014 : 116 MWh (1113 kWh/ KW) [26]

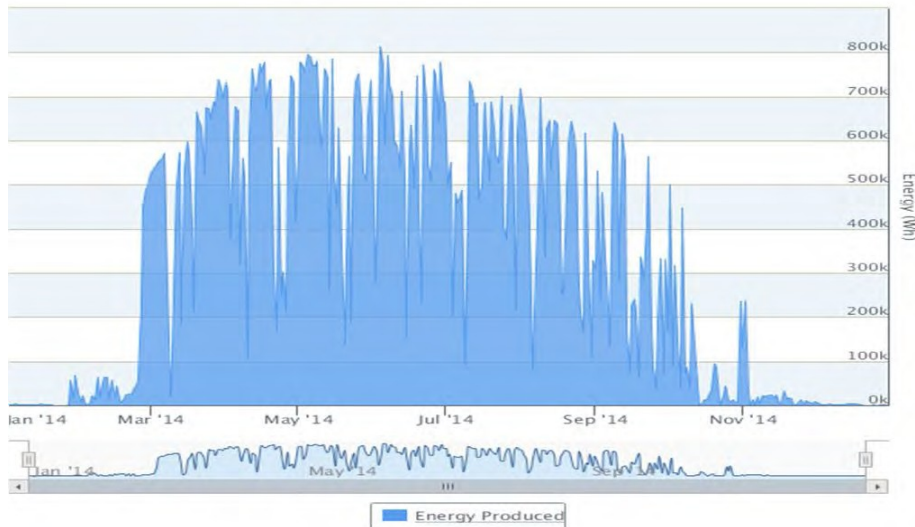


Figure 25: Production des cellules PV pour l'année 2014

- COMPARAISON DE PERFORMANCE ENTRE DEUX CONVERTISSEURS

Les micro-onduleurs présentent certains avantages, comparés aux autres onduleurs string qui sont montés sur un ensemble de modules en série, les micro-onduleurs par contre sont montés directement sur chaque module. L'avantage est que les micro-onduleurs éliminent le problème de point individuel de défaillance que posent souvent les onduleurs string. En plus, ils apportent la facilité du contrôle de l'efficacité avec une amélioration de la finesse du système. Enfin une défaillance sur un module n'affecte pas les autres [26, 49].

4.4 CONCLUSION

Ce chapitre présente deux cas d'exploitation d'énergie renouvelable en régions nordiques particulièrement pour les sites isolés alimentés principalement en énergie fossile. Certains aspects du développement des ENR en régions nordiques doivent être considérés surtout du point de vue technologique. Le choix de la technologie adaptée est un élément important dont dépendra la viabilité du projet. Ainsi nombre de projets connaîtront des échecs, souvent causés par une mauvaise estimation des conditions d'exploitation qui mettent en péril tout le projet. Afin de miser sur la durabilité du projet, il est important d'investir sur la durabilité des équipements d'exploitation, sur les personnels d'exploitations, sur les conditions d'exploitation et tous les facteurs externes qui contribueront au bon déroulement du projet jusqu'à la mise en service. Les deux cas présentés dans ce chapitre ont démontré la viabilité de projets d'exploitations éoliennes et photovoltaïques en régions nordiques, avec une rentabilité du coût d'exploitation. Ces exemples servent à encourager plus de projets d'innovation en région nordique, tout en rendant moins sceptiques les investisseurs des secteurs énergétiques. C'est aussi l'occasion pour les manufacturiers de développer des kits de leurs produits respectifs adaptés au climat nordique où un large marché est ouvert aux énergies alternatives à cause du coût de l'énergie fossile fluctuant. Les gouvernements des régions nordiques ont une vision plus en plus verte de leurs communautés avec des changements en perspectives. La prise de conscience sur les conséquences réelles des effets des GES a encouragé les autorités à changer leurs politiques énergétiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet avait pour but de ressortir les éléments considérés dans le cadre d'une mise en place d'une organisation logistique pour des projets à énergies renouvelables pour des sites isolés en régions nordiques. La plupart de ces régions du Nord subissent les mêmes conditions atmosphériques avec un certain degré de sévérité dépendant d'une région à une autre. La logistique dans ces conditions est d'une importance capitale vu les conditions et les difficultés d'exploitations auxquelles seront soumis les différents systèmes de production d'énergies renouvelables. Cette logistique a pour vocation d'accompagner tout le projet de la phase de la conception, à la réalisation et jusqu'à la fin de vie du projet. Ainsi, les outils qui nous avons cité dans ce travail comme élément d'optimisation sont intéressants surtout pour des projets des grandes envergures et exploités dans ces conditions climatiques.

Pour fin de rentabilité et de retour sur investissement de l'énergie verte, la notion du potentiel de viabilité doit-être établie. En effet la ressource verte prise comme solution alternative au diesel exploité dans ces régions pour s'alimenter en raison de l'éloignement de celles-ci du réseau central de distribution, doit-être concurrentielle. Nous avons comparé différentes sources d'énergie renouvelable afin de voir leur degré viabilité, la ressource éolienne a obtenu une valeur nette positive pour cause, les régions nordiques ont la particularité de posséder un bon potentiel éolien à l'exemple du site de la mine Raglan où le vent est de classe 1. Ce potentiel est exploitable avec les technologies adaptées ainsi nous avons exploré les différentes technologies éoliennes adaptées pour le climat froid.

De plus en plus de fabricants s'intéressent au marché éolien en climat froid à cause d'un futur prometteur dans ces régions. Le prix du combustible ne cessant d'augmenter les solutions alternatives existent. Mis à part l'éolien on s'est intéressé au photovoltaïque, bien que la ressource solaire ne soit pas abondante en hiver, les régions nordiques ont la particularité d'améliorer les performances des cellules PV. Cette énergie est donc exploitable en région nordique surtout pendant l'été où les journées ensoleillées sont

longues et que la charge est réduite. Les différents projets d'énergies vertes démontrent la faisabilité de ce type de projet afin de rendre moins sceptiques certains opérateurs qu'il est possible d'exploiter les ressources disponibles même dans des conditions extrêmes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Théodore Wildi, G.S., *Electrotechnique 4e édition*. 2005.
2. EDF, O.E., la fondation des énergies pour le monde, *la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde , quinzième inventaire éd.2013*. 2013.
3. Luc Lasne, J.-C.G., *Electrotechnique et énergie électrique*. 2014.
4. Joel Sohler, D.S., *Logistique 7e Ed*. 2013.
5. Saulnier, B., *Analyse of wind-diesel alternatives for designm plannd and operation of Quebec's autonomous grids, principes project Benchmarkind, outlook and recommandations* 2011.
6. Michael Ross, J.R., *Photovoltaics in cold climate*.1999.
7. Gouvernement du Yukon, T.d.N.-O., Nunavut, *vers un nord axé sur les énergies renouvelables. une vision nordique batir un nord meilleur*, 2014: p. <http://www.anorthernvision.ca/fr/inventory/>.
8. Pearce, N.c.M.J.M., *Renewables energy policies and programs in Nunavut: Perspectives from then federal and territorial Governments*.2012. **vol.65, NO.4(décembre 2012)**: p. P.465-475.
9. Basbous, T., *hybridation pneumatique d'un moteur diesel en vue de son utilisation dans son utilisation dans un système Hybride Éolien-Diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé*. 2013.
10. Serra, L., *Barrières à l'implantation de projet d'énergie renouvelable dans les communautés hors réseau des régions nordiques canadiennes*.2011: p. P.45.
11. Bartoli, C., *Presentation Rio Tinto Diavik Wind Farm*. 2015.
12. Wyk, L.V., *Diavik Diamond Mines Inc. Wind farm project*.
13. mercure, p., *mine Raglan un projet éolien en jeu*.<http://affaires.lapresse.ca/economie/energie-et-ressources/201209/21/01-4576474-mine-raglan-un-projet-deolienne-en-jeu.php>, septembre 2012.
14. RODRIGUE, P., *LE VENT SOUFFLE DANS LA BONNE DIRECTION POUR LA MINE RAGLAN*.<http://www.hebdosregionaux.ca/abitibi-temiscamingue/2014/12/22/le-vent-souffle-dans-la-bonne-direction-pour-la-mine-raglan>, 2014.
15. Canada, r., *projet pilote de démonstration du réseau intelligent d'électricité renouvelable à la mine Raglan Glencore*.<http://www.rncan.gc.ca/node/16663>, décembre 2014.
16. *premier projet industriel d'énergie éolienne avec stockage au canada*.<http://friendsofwind.ca/fr/mine-raglan-le-premier-projet-industriel-denergie-eolienne-avec-stockage-au-canada/>, septembre 2014.
17. Canada, i.-r., *l'éolienne de tous les défis*.<https://enjeuxenergies.wordpress.com/2015/03/16/arctique-leolienne-de-tous-les-defis-ici-radio-canada-ca/>, mars 2015.

18. Dansereau, s., *la mine verte raglan , un bénéfice pour le nunavik*.<http://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/ressources-naturelles/la-mine-verte-de-raglan-un-benefice-pour-le-nunavik/568154>, juillet 2014.
19. ENERGIE, T., *QUAND LE VENT DEVIENT UN CARBURANT*.
20. Joel , D.S., *Logistique 7e édition*. mars 2103.
21. J .L Hulsey, P.A.k., F.L Bennett, Jonh J. Kelley, *COLD REGIONS LOGISTICS PLANNING AND MANAGEMENT*. journal of cold region Engineering, 1992.
22. Schlosser, P., W. Tucker, W. Warnick, A.York, *Arctic research support and logistics: strategies and recommendations for system scale studies in changing environment*. 2003.
23. *mining in the extrem*. march 2014.
24. A.C. Larsen , T.M., *Mapping of operations , maintenance and support design factors in arctic environment*.2007.
25. Vallin, P., *la logistique, Modèles et méthodes du pilotages des flux 2e éditiom*.2001.
26. Goswamy, N., *perfromance, reliability and duralibiltyof solar PV system for northen regions of Canada*. ressources naturelles Canada, 2015.
27. .Guiterez, J., *Cours Planning de PERT*.
28. N. Séguin, R.J., L. Laponte , J. Pagé, A. Rouleau, K. Normandeau, G. Jéremeie, D. Henri, M. Beaumier, G. Préfontaine, V. rmstrong, P. Choquette, Édith Normandeau, M. Pilon, P. Cordeau, L. Talon, *Étude d'impact sur l'environnment - Projet d'énergie éolienne à katinniq*.2013.
29. T.wellenuis, V.L., *Overview of cold climate wind energy:Challenges, solutions and futur needs*. 2016.
30. council, G.w.e., *glabal wind energy report: annual market update 2014*. 2015.
31. Lehtomak, V., *Task 19: wind energy in cold climate* IEA, 2014.
32. T. Laakso, H.H., GrRosten, L Tallhaug, R Horbaty , A. Lacroix ,I Borind-Gould, B. Tammelin *state of the art of wind enrgy in cold climate* IEA 2003: p. 50.
33. O. Parent , A.I., *Anti-icing and de-icing technique for wind turbine critical review, cold region science and technologie*. elsevier, 2010. **else**.
34. I. Baring-Gould, M.D., M. Hulkkonen, A.Krenn, T.Laakso, A. Lacroix, E. Peltola, G.Ronsten ,L. Tallhaug,T. Wellenuis, R. Cattin, *expert group study on recommended practices 13. wind energy projects in cold climates EDITION 2011*. iea wind energy, mai 2012.
35. I. Baring-Gould, M.D., M. Hulkkonen, A.Krenn, T.Laakso, A. Lacroix, E. Peltola, G.Ronsten ,L. Tallhaug,T. Wellenuis, *wind energy in cold climate fianl report IEA edition 2009*.IEA 2009 avril.
36. A. Bekhti, O.G., *Influence de la rugosité sur la caratristique de l'aérodynamique d'un profil de la pale d'éolienne*. revue des énergies renouvelables, 2012.
37. Dimitrova, M.H., *pertes énergétiques d'une éolienne à partir de formes glace simulées numériquement*. mémoire de recherche présentée à l'université du Québec à Rimouski, août 2009.
38. H., S., *technical requirement for rotor blades opérating in cold climate* deutshs winenergie institute gmbh.

39. I. Baring-Gould, M.D., M. Hulkkonen, A.Krenn, T.Laakso, A. Lacroix, E. Peltola, G.Ronsten ,L. Tallhaug,T. Wellenuis, *state of the art of wind energy in cold climate edition 2009*. iea 2009 août.
40. A., I., *analyse and mitigation of icin effect on wind turbine*. 2011.
41. i. Baring-Gould, M.D., M. Hulkkonen, A.Krenn, T.Laakso, A. Lacroix, E. Peltola, G.Ronsten ,L. Tallhaug,O. Byrkjedal, *state of the art of wind energy in cold climate*. iea wind energy, 2012 octobre.
42. Dusson, A., *caractérisation et dimensionnement des systèmes hybride photovoltaïques-diesel mémoire présenté pour l'obtention de maîtrise de science et technique*. université des sciences et techniques de Lille, 2002.
43. Michael Ross, J.R., *Photovoltaics in cold climate*. 1999.
44. Jeyna Meydbray, K.E., Sarah Kurtz, *pyranometers and reference cell what's the difference*. 2012.
45. Solitis, *Pertes de production dues à l'ombrage*. p. <http://www.soltis.be/fr/photovoltaïque/aspects-techniques/perte-de-production-cause-ombrage/>.
46. Y. Poissant, D.T., D. Turcotte, *performance monitoring of the nunavut arctic college PV system: nine years for reliable electricity generation*. 2004.
47. Energy, s.f., *104 LW diesels offset solar photovoltaic system: fort simpson northwest territories*.<http://www.skyfireenergy.com/northern-reflections-from-fort-simpson-nt-to-orillia-on/>.
48. Berub, M., *NTPC- renewable and alternative energy project experience in our northern communities*.
49. Photovoltaïque.info, *tout sur le photovoltaïque*.2012: p. <http://www.photovoltaïque.info/Micro-onduleur-onduleur-string-ou.html>.