



Étude d'un système hybride pour l'alimentation d'un site isolé et optimisation de la charge : cas du camp Esker

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A)

PAR

© **KOMLAN JOSUE DJROMADJI**

Février 2022

Composition du jury,

Hussein Ibrahim, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamed Yasser Hayyani, codirecteur de recherche, UQAR

Sasan Karganroudi, examinateur externe, ITMI

Dépôt initial le 24 janvier 2022

Dépôt final le 15 février 2022

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 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.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier et à exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude à monsieur Adrian Ilinca Professeur à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant l'encadrement de mon travail ainsi que pour sa disponibilité et ses aides précieuses. Mes sincères remerciements vont aussi à monsieur Hayyani Mohamed Yasser co-directeur de ce mémoire pour sa contribution immense. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur Jean-Louis Chaumel pour son temps et les informations données pour l'aboutissement de ce mémoire. Je remercie également Monsieur Majed Fantar, directeur d'Audace Technologies Inc (ATI) de m'avoir accepté dans son entreprise et de son encadrement technique. Un grand remerciement à toute l'équipe d'ATI pour leurs aides de diverses manières.

RÉSUMÉ

Dans les communautés isolées, en général l'électricité est produite par des génératrices diesel, car la connexion aux réseaux centraux de distribution est difficile et onéreuse. Les génératrices diesel dont le fonctionnement requiert l'utilisation de larges quantités de combustibles fossiles posent de sérieux problèmes environnementaux, sociaux et même économiques. Elles contribuent à l'émission des gaz à effet de serre et au réchauffement climatique. La solution proposée par la communauté scientifique est le recours aux énergies renouvelables, disponibles gratuitement, avec un très faible taux de pollution comparé aux génératrices diésel. L'installation d'un système d'énergie renouvelable (SER), tout particulièrement en sites isolés, rencontre des problèmes d'opération, entretien et diagnostic. En effet, il est très important de connaître le potentiel en énergie renouvelable pour savoir comment faire un compromis entre le coût du projet et son financement. Le but de ce mémoire est de faire l'étude d'une station hybride d'énergie renouvelable pour alimenter un camp en zone isolée, dans le nord du Québec; plus spécifiquement nous avons fait une étude de la faisabilité pour une alimentation en énergie électrique renouvelable d'une station de base en zone isolée avec une combinaison de modules Green Cube et proposé des solutions d'économies d'énergie afin de réduire la charge, de retarder l'utilisation des génératrices, mais avoir une grande pénétration des énergies renouvelables et contribuer à réduire l'émission des gaz à effet de serre.

Le premier chapitre est une introduction générale ayant pour objectif de situer le projet dans son contexte. Le deuxième identifie les problématiques liées aux sites isolés. Le troisième expose la conception et modélisation du système à implanter, le quatrième qui est la caractérisation de la charge, et le dernier qui est une optimisation de la charge afin de proposer les solutions pour réduire considérablement la consommation de carburant diesel et conséquemment les émissions de GES (gaz à effet de serre).

Mots clés : Énergie renouvelable, Green Cube, Optimisation, économie d'énergie, efficacité énergétique

ABSTRACT

In remote communities, electricity is usually generated by diesel generators, as connection to central distribution networks is difficult or expensive. Diesel generators, which require large quantities of fossil fuels to operate, pose serious environmental, social and even economic problems. They contribute to greenhouse gas emissions and global warming. The solution proposed by the scientific community is the use of renewable energies, freely available, with a very low pollution rate compared to diesel generators. The installation of a renewable energy system (RES), especially in isolated sites, encounters problems of operation, maintenance and diagnosis. Indeed, it is very important to know the renewable energy potential in order to know how to make a compromise between the project cost and its financing. The purpose of this thesis is to study a hybrid renewable energy station to supply a camp in an isolated area in northern Quebec; more specifically, we have studied the feasibility of supplying renewable electrical energy to a base station in an isolated area with a Green Cube and proposed energy-saving solutions to reduce the load, delay the use of generators, but have a high penetration of renewable energy and in passing reduce greenhouse gas emissions.

The first chapter is a general introduction with the objective of placing the project in its context. The second chapter deals with the problems related to the isolated sites, the third one talks about the design and modeling of the system to be implemented, the fourth one is the characterization of the load and the last one is an optimization of the load in order to propose the solutions to reduce considerably the load.

Keywords: Renewable energy, Green Cube, Optimization, energy saving, energy efficiency

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vi
RÉSUMÉ.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE LIÉE À ESKER	3
1.1 PROBLÉMATIQUE	3
1.3 SITUATION DU CAMP ESKER DU POINT DE VUE ÉNERGÉTIQUE.....	4
1.4 CONTRAINTES LIÉES AU CAMP ESKER	4
1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	5
1.6 STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	5
CHAPITRE 2 : LES PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX SITES ISOLÉS	7
2.1 INTRODUCTION.....	7
2.1.1 Contexte d'étude des sites isolés au Canada	8
2.1.2 Production électrique en site isolé.....	11
2.1.3 Solutions proposées aux problèmes liés à l'électrification des sites isolés	12
2.1.4 Les obstacles liés à l'utilisation des générateurs diesel en sites isolés	12
2.2 ÉTUDES DES SYSTÈMES HYBRIDES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUES	13

2.2.1 Pourquoi l'hybridation ? Quelle est sa plus-value ?	13
2.2.2 Pourquoi l'hybridation ?	14
2.2.3 Éléments d'un système hybride (solaire-éolien diesel-batterie).....	14
2.2.4 Répartition des systèmes hybrides de production électrique.....	21

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODÉLISATION D'UN SYSTÈME HYBRIDE

D'ALIMENTATION DU CAMP ESKER.....	23
3.1 INTRODUCTION.....	23
3.1.1 Évaluation du potentiel éolien du site	24
3.1.2 Données nécessaires à l'étude	24
3.1.3 Estimation du potentiel éolien du site	26
3.2 ÉVALUATION DU POTENTIEL SOLAIRE SU SITE	34
3.2.1 Description du logiciel Homer Pro.....	34
3.3 SIMULATIONS AVEC HOMER	36
3.3.1 Système actuel au camp Esker	36
3.3.2 Système proposé.....	36
3.3.3 Consommation électrique du camp	38
3.3.2.1 PV: Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (sud).....	39
3.3.2.2 PV: Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (nord).....	40
3.3.2.3 Éoliennes de 30 kW	41
3.3.2.4 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (Diesel)	42
3.3.2.5 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (1) (Diesel).....	43
3.3.2.6 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (2) (Diesel).....	44
3.3.2.7 Generator: Generic 100kW SD100 (Diesel).....	45
3.3.2.7 Stockage : Discovery 6VRE-2600FD	46

3.3.2.8 Convertisseur ABB MG S100	47
3.5 TECHNOLOGIE GREEN CUBE.....	48
3.5.1 Définition.....	48
3.5.2 Spécifications techniques	48
3.5.2.1 Le Green Cube GC Max.....	49
3.5.2.2 Le Green Cube GC-6.....	50
3.5.2.3 Le Green Cube GC-Mobile	52
3.5.2.4 Le Green Cube GC-Volt.....	54
3.5.2.5 Configuration des Green Cube à implanter	55
3.6 MODIFICATION DE CERTAINS PARAMÈTRES CONCERNANT LA CONFIGURATION PROPOSE	55
3.6.1 Regroupement des génératrices de 10 kW	55
CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DE LA CHARGE AU CAMP ESKER	57
4.1 INTRODUCTION.....	57
4.2 BILAN ÉNERGÉTIQUE DES CHARGES À ESKER	57
4.2.1 Charges existantes à Esker	57
4.2.2 Énergie consommée par chacune des charges.....	59
4.2.3 Courbe de l'énergie pendant une journée	60
4.3. DIVERS SCENERIOS POSSIBLE	60
4.3.1 SOLAIRE DE 6 kW + EOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh.....	61
4.3.2 DIESEL DE 100 kW + SOLAIRE DE 6 kW + EOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh	62
4.3.3 DIESEL DE 100 kW + DIESEL DE 30 kW+ SOLAIRE DE 6 kW + EOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh.....	63
4.4 CONCLUSION	64

CHAPITRE 5 : OPTIMISATION DE LA CHARGE ET EFFICACITÉ	
ÉNERGÉTIQUE.....	65
5.1 INTRODUCTION.....	65
5.2 ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	65
5.2.1 Recommandations pour l'efficacité énergétique du site.....	65
5.2.2 L'éclairage.....	66
5.2.3 Les équipements de cuisine	66
5.2.4 Le chauffage	67
5.2.5 Le chauffe-eau	67
5.2.6 Les réfrigérateurs.....	68
5.3 RÉCAPITULATIF DES AMÉLIORATIONS POSSIBLES.....	68
5.4 AUTRES ALTERNATIVES DE SOLUTIONS.....	69
5.4.1 Le chauffage	69
5.4.2 Le chauffe-eau	72
5.5 RÉCAPITULATIF.....	74
5.6 CONCLUSION.....	74
CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE .	75
6.1 DEFINITION	75
6.1.1 Les principaux gaz à effet de serre	75
6.1.2 Les effets nocifs des gaz à effet de serre.....	75
6.1.4 Les solutions pour réduire l'effet des gaz à effet de serre.....	75
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	78
Suggestions de travaux	79
Références bibliographiques.....	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Collectivités éloignées du Canada et leur population.....	9
Tableau 2 : Puissance installée dans les collectivités lointaines du Canada.....	10
Tableau 3 : Stockage d'énergie pour le support de réseau de transport et de distribution....	20
Tableau 4 : Classification des systèmes d'énergie hybrides.....	21
Tableau 5 : Classification des systèmes éoliens-diesel basé sur le taux de pénétration	22
Tableau 6 : Données de l'Atlas éolien pour le camp Esker.....	27
Tableau 7 : Données de l'Atlas éolien pour Schefferville.....	27
Tableau 8 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à 10 m pour l'Atlas éolien.....	29
Tableau 9 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à 10 m.....	29
Tableau 10 : Données Environnement Canada pour Schefferville.....	30
Tableau 11 : Données mensuelles estimées à Schefferville pour l'Atlas éolien.....	31
Tableau 12 : Données mensuelles estimées au camp d'Esker pour l'Atlas éolien.....	32
Tableau 13 : Données mensuelles estimées au camp d'Esker pour Environnement.....	33
Tableau 14 : Paramètres du Canadian Solar Super Power CS6K-295MS.....	39
Tableau 15 : Paramètres du Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (nord).....	40
Tableau 16 : Paramètres des éoliennes de 30 kW.....	41
Tableau 17 : Paramètres de la génératrice de 10 kW.....	42
Tableau 18 : Paramètres de la génératrice de 10 kW (1).....	43
Tableau 19 : Paramètres de la génératrice de 10 kW (2).....	44
Tableau 20 : Paramètres du générateur de 150 kW.....	45
Tableau 21 : Paramètres du stockage de 105 kWh.....	46
Tableau 22 : Paramètres du convertisseur ABB MG 100.....	47
Tableau 23 : les Spécifications du Green Cube Max.....	49
Tableau 24 : les Spécifications du Green Cube 6.....	50
Tableau 25 : Les spécifications du Green Cube Mobile.....	52
Tableau 26 : Les Spécifications du Green Cube-Volt.....	54

Tableau 27 : Avantages et inconvénients de trois génératrices de 10 kW	56
Tableau 28 : Avantages et inconvénients d'une génératrice de 30 kW	56
Tableau 29 : Charges existantes à Esker.....	58
Tableau 30 : Énergies consommées par chacune des charges	59
Tableau 31 : Les résultats de la simulation pour le premier scénario.....	61
Tableau 32 : Les résultats de la simulation pour le deuxième scénario.....	62
Tableau 33 : Les résultats de la simulation pour le troisième scénario	63
Tableau 34 : Récapitulatif des solutions	68
Tableau 35 : Systèmes de chauffage et de chauffe-eau recommandés	74
Tableau 36 : Résumé des émissions de gaz à effet de serre	76
Tableau 37 : Évaluation de GES jusqu'en 2050	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du camp Esker (David, C.2016).....	3
Figure 2 : Réseau ferroviaire de Tshuétin (David, C.2016)	4
Figure 3 : Carte des communautés isolées au Canada (Nicolas, M. 2015).....	7
Figure 4 : Page d'accueil de la base de données sur l'énergie dans les collectivités éloignées	11
Figure 5 : Système hybride de type SHEDACPE (Hunter R., E.G 1994).	13
Figure 6 : Principe de production d'électricité (Richard, L. 2018)	15
Figure 7 : Coût de la production de l'énergie solaire PV (\$/MW) (Leng et Coll. 2000).....	15
Figure 8: Puissance éolienne installée dans le monde (CDE Mars 2020).	16
Figure 9 : Schéma d'une éolienne (Richard, L. 2018).....	17
Figure 10 : Carte des réseaux autonomes alimentée par diesel (Québec, H 2017).....	18
Figure 11: Différentes parties d'un groupe électrogène (BOGRE, G.R. (2012).....	19
Figure 12: Marché mondial des batteries au Lithium-ion (Dunn, B, and J.-M. T,2011)	21
Figure 13 : Interface du logiciel HOMER	24
Figure 14 : Paramétrage de la rugosité du site.....	25
Figure 15 : Gisement solaire du camp Esker	35
Figure 16 : Système proposé.....	36
Figure 17: Système actuel et système proposé	37
Figure 18 : Production de chaque source d'énergie durant l'année.....	38
Figure 19 : Production journalière du panneau solaire CS6K-295MS	39
Figure 20 : Production journalière du panneau solaire CS6K-295MS(1)	40
Figure 21 : Production journalière des éoliennes de 30 kW	41
Figure 22 : Production journalière de la première génératrice de 10 kW	42
Figure 23 : Production journalière de la deuxième génératrice de 10 kW	43
Figure 24 : Production journalière de la troisième génératrice de 10 kW	44
Figure 25 : Production journalière de la génératrice de 100 kW	45

Figure 26: Capacité du stockage pendant la journée	46
Figure 27 : Énergie transitée à travers le convertisseur pendant la journée	47
Figure 28 : Green Cube GC-6.....	51
Figure 29 : Green Cube mobile.....	53
Figure 30 : Green Cube GC-Volt.....	55
Figure 31 : Courbe de consommation d'énergie.....	60
Figure 32 : Schéma de principe d'une chaudière à condensation (Guide-Prix, 2016)	70
Figure 33 : Schéma de principe d'une chaudière à pellets	71
Figure 34 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire (Ecohabitation,2017).....	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

ATI	Audace Technologies Inc
CANWEA	Canadian Wind Energy Association
CDE	Connaissance des Énergies (https://www.connaissancedesenergies.org/)
GC	Green Cube
GES	Gaz à effet de serre
GD	Générateur diesel
PV	Panneaux solaires
SER	Système d'énergie renouvelable
WT	Wind Turbine

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années (Feltane S et Bouklab S, 2021). L'augmentation des coûts énergétiques et les contraintes environnementales poussent vers la mise au point de solutions technologiques permettant une meilleure maîtrise des ressources et une meilleure exploitation des énergies renouvelables (Mohamed S, 2016). Cependant, les énergies renouvelables ont pour défaut de dépendre des conditions météorologiques, souvent très variables et difficiles à prévoir avec précision. Pour obtenir une production la plus régulière possible, une solution consiste à hybrider différents types de sources en exploitant plusieurs sources renouvelables d'une manière bien gérée, bien coordonnée, optimisée et efficace (Lila C, 2014).

Les réseaux de distribution ne peuvent suffire à fournir de l'électricité à toute la population mondiale : qu'ils soient en pleine montagne ou sur une île, dans les régions les moins habitées ou au milieu du désert, les sites difficiles d'accès ou très isolés ne peuvent pas toujours être raccordés au réseau, faute de solutions techniques ou de viabilité économique (Sahraoui H, 2020). Or, pouvant être dimensionnées pour un usage domestique, les sources d'énergie renouvelables se prêtent particulièrement bien à la production d'électricité dite en site isolé, ou en micro réseau. Elles sont alors souvent associées à des batteries, qui permettent d'assurer le stockage de l'énergie en cas de production excédentaire ou par une génératrice afin de compenser le manque momentané de puissance lors des pics de consommation. Cette solution permet de réduire les coûts de maintenance et augmente la durée de vie des génératrices installées en site isolé et permet de réduire les émissions des gaz à effets de serre.

CHAPITRE 1 : MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE LIÉE À ESKER

1.1 PROBLÉMATIQUE

Le camp Esker, situé dans une zone isolée et hors réseau de la province de Terre-Neuve-et-Labrador, est une partie importante du réseau ferroviaire de Tshiuétin (Figure 1, Figure 2). Ce camp sert de lieu d'hébergement, de ravitaillement et de travaux d'urgence pour les employés de Transport ferroviaire Tshiuétin durant la période estivale. L'entreprise autochtone Transport Ferroviaire Tshiuétin exploite la ligne ferroviaire de 210 km constituant l'unique voie de transport terrestre vers Schefferville. Cette ligne ferroviaire part de la station Emeril Junction située près de Fermont et Labrador City, soit à 360 km au nord de Sept-Îles. Au kilométrage 456 se trouve la station Esker et son camp. La voie ferrée entre Emeril Junction et Schefferville est dépourvue de toute alimentation électrique. La Figure 1 présente la situation géographique du camp Esker.



Figure 1 : Situation géographique du camp Esker (David, C.2016)



Figure 2 : Réseau ferroviaire de Tshiuetin (David, C.2016)

1.3 SITUATION DU CAMP ESKER DU POINT DE VUE ÉNERGÉTIQUE

Étant éloigné des réseaux de distribution électriques, le camp Esker est alimenté à 100% par un groupe électrogène de 150 kW. Le groupe électrogène malgré le fait de fournir au camp l'énergie électrique requise présente assez d'aspects négatifs comme :

- Le bruit excessif ;
- L'augmentation des gaz à effet de serre d'où la pollution de l'environnement ;
- L'entretien régulier pour un fonctionnement optimal ;
- L'incapacité des génératrices à ne pas supporter une température glaciale ;
- Le prix du carburant, qui est encore plus élevé avec le transport, rendant ainsi le prix de l'électricité (\$/kWh), beaucoup plus cher qu'ailleurs.

1.4 CONTRAINTES LIÉES AU CAMP ESKER

Au vu des différents aspects négatifs entourant l'utilisation de la génératrice, il est prévu une étude en vue de l'utilisation d'un maximum d'énergies propres pour subvenir aux

besoins énergétiques du camp. Ceci vise de réduire au maximum l'utilisation de la génératrice et aller vers les énergies renouvelables accompagnées d'un stockage par batteries. Il est à noter que le camp dispose de ressources en énergies solaires et éoliennes non négligeables. Ce projet sera réalisé par ATI, une entreprise qui offre une solution énergétique pour les sites isolés. Dans le but d'aller vers les énergies renouvelables afin de pallier les problèmes environnementaux, économiques et sociaux, il nous est proposé de faire une étude en vue d'implanter un système qui pourrait résoudre les problèmes précités.

1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les objectifs de cette recherche sont, entre autres, de :

- Dimensionner et modéliser un système permettant la combinaison des différentes sources d'énergie telle que l'éolienne, le solaire, la génératrice et les batteries ;
- Faire une caractérisation de la charge afin de voir les pics de courant à différents moments au cours de l'été ;
- Faire une étude visant à réduire les charges énergivores en vue de retarder le démarrage de la grande génératrice d'où une forte pénétration des énergies renouvelables et une réduction des gaz à effet de serre.

1.6 STRUCTURE DU MÉMOIRE

Afin de mener à bien cette étude, le travail sera structuré en six chapitres enveloppés de part et d'autre par une introduction et une conclusion générale. Le premier chapitre fera l'objet d'une mise en contexte et des problématiques liées au camp. Le deuxième portera sur les sites isolés et l'étude des systèmes hybrides. Le troisième parlera du dimensionnement et de la modélisation d'un système hybride afin de trouver la configuration optimum pour desservir le camp. Le quatrième fera cas de l'étude de la caractérisation de la charge pour déterminer les pics de courant en été et analyser le taux de pénétration des énergies renouvelables. Le quatrième chapitre sera consacré à la proposition de solution pour l'optimisation de la charge et tendre vers l'efficacité énergétique pour le cinquième. Le dernier chapitre parlera d'une évaluation des émissions de gaz à effet de serre.

CHAPITRE 2 : LES PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX SITES ISOLÉS

2.1 INTRODUCTION

Au Canada près de 300 communautés sont isolées comme nous le montre la Figure 3. Ces communautés sont pour la plupart alimentées par des génératrices diesel (Richard, L. 2018). Bien qu'étant une source d'énergie sûre, elle n'en reste tout de même pas sans conséquence, compte tenu de l'inflation galopante des prix de carburants, en relation directe avec la distance et les frais liés à la logistique du transport. Ces dépenses peuvent être évitées, ou du moins réduites de manière considérable pour servir à d'autres projets dans la communauté. La problématique des communautés isolées se retrouve dans d'autres applications qui ont besoin d'énergie électrique comme les stations de télécom, les stations météo, les stations de pompage d'eau, les îles, les sites miniers, les bases scientifiques et militaires, les fermes agricoles et les refuges. Le développement économique et social du Canada dépend aussi de ces communautés en forte croissance, donc il est important de penser à des solutions pour résoudre les problèmes liés à l'utilisation excessive des génératrices diesel. La solution la plus appropriée dans la littérature, et à moindre coût en ce moment est l'utilisation de l'énergie renouvelable. Le meilleur avantage est de combiner plusieurs sources de production d'énergie pour accroître leur fiabilité et assurer ainsi une production d'énergie continue malgré les variations météorologiques au cours de l'année.

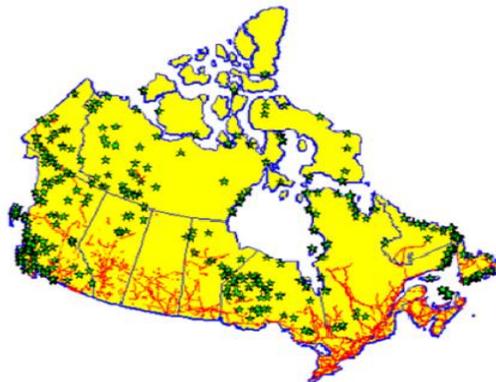


Figure 3 : Carte des communautés isolées au Canada (Nicolas, M. 2015)

Avec l'arrivée des réseaux électriques intelligents, il est possible d'assurer et de contrôler la consommation et la production d'électricité sur ces sites tout en quantifiant le potentiel énergétique renouvelable de chaque communauté. Cette approche technologique permettra ainsi de réduire considérablement les dépenses liées à l'expansion des générateurs diesel, de lutter contre l'augmentation des gaz à effet de serre, d'accroître le taux de pénétration des énergies vertes (Richard, L. 2018).

Nous allons en premier présenter la problématique des sites isolés au Canada et du cas concret qui est le camp Esker. En seconde partie une étude générale des systèmes hybrides de production d'énergie renouvelable sera faite. Ensuite, il sera question de la conception du système hybride d'alimentation du camp Esker, suivie d'une caractérisation de la charge et son optimisation afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'utilisation des sources renouvelables et faire une évaluation des émissions de gaz à effet de serre.

2.1.1 Contexte d'étude des sites isolés au Canada

Un site est dit « isolé ou autonome » s'il décrit une production d'énergie électrique indépendamment du réseau de distribution principal, soit par le fait que le réseau de distribution principal n'existe pas à cause des difficultés d'installation, ou alors le coût d'installation d'un tel système n'est pas justifié économiquement, ou par volonté personnelle (Moussavi et al 2013). On peut citer entre autres plusieurs catégories de communautés dites isolées (Moussavi et al 2013):

- Les communautés éloignées et isolées
- Les communautés isolées
- Les communautés semi-isolées

D'après (Ibrahim, H. 2010), un site dit autonome ou isolé doit répondre aux critères suivants

- Le site n'a aucun lien avec le réseau de distribution principal, que ça soit avec du gaz naturel ou toute autre source d'énergie traditionnelle ;

- Le site doit avoir une existence d'au moins 5 ans et avoir un nombre d'habitations supérieur à 10 habitations.

Le Canada est un très vaste pays, avec une population d'à peu près 36.29 millions d'habitants (recensement de 2016 de statistique Canada). La population dans les sites isolés représente un peu plus de 200 000 habitants.

D'après le catalogue No 57-202-X de statistique Canada de 2007 :

- « En 2007, le charbon a représenté 76% de l'ensemble des combustibles consommés pour la production d'électricité au Canada et 35% du coût de ces combustibles. À l'inverse, le gaz naturel a représenté 14% de l'ensemble des combustibles consommés en 2007, mais 48% du coût des combustibles utilisés.
- Au total, l'Alberta a utilisé 52% du charbon et 36% du gaz naturel consommés au Canada pour la production d'électricité, tandis que l'Ontario a consommé 24% et 34%, respectivement, et la Saskatchewan, 17% et 9%, respectivement ».

Tableau 1 : Collectivités éloignées du Canada et leur population

Province ou territoire	Type	N ^{bre} de sites	Population
Colombie-Britannique (C.-B.)		86	24 068
	<i>Autochtone</i>	25	7 619
	<i>Non autochtone</i>	61	16 449
Alberta (Alb.)		2	533
	<i>Autochtone</i>	0	0
	<i>Non autochtone</i>	2	533
Manitoba (Man.)		7	3 063
	<i>Autochtone</i>	4	2 160
	<i>Non autochtone</i>	3	903
Saskatchewan (Sask.)		1	57
	<i>Autochtone</i>	1	57
	<i>Non autochtone</i>	0	0
Ontario (Ont.)		38	21 342
	<i>Autochtone</i>	25	14 236
	<i>Non autochtone</i>	13	7 106
Québec (Qc)		44	34 729
	<i>Autochtone</i>	19	15 452
	<i>Non autochtone</i>	25	19 277
Terre-Neuve et Labrador (T.-N.-L.)		28	8 910
	<i>Autochtone</i>	16	5 634
	<i>Non autochtone</i>	12	3 276
Yukon (Yn)		22	30 176
	<i>Autochtone</i>	21	29 840
	<i>Non autochtone</i>	1	336
Territoires du Nord-Ouest (T.N.-O.)		38	41 950
	<i>Autochtone</i>	33	22 410
	<i>Non autochtone</i>	5	19 540
Nunavut (Nt)		26	29 453
	<i>Autochtone</i>	26	29 453
	<i>Non autochtone</i>	0	0
Total général		292	194 281

Status of remote off-grid communities in Canada (Août 2011)

Tableau 2 : Puissance installée dans les collectivités lointaines du Canada

Province ou territoire	Principale source d'énergie	Type de combustible fossile	Puissance CF - kW	Nombre de sites
Alb.	Combustible fossile (CF)	Diesel	1 450	1
Total – Alb.			1 450	1
C.-B.	CF	Diesel	63 894	26
		Diesel, avec restrictions*	20	1
		Inconnu	3 838	35
	Hybride (CF et énergie renouvelable)	Diesel	305	1
	Hydroélectricité	Diesel	250	1
Diesel en appoint		2 650	1	
s/o	s/o	0	15	
Total – C.-B.			70 957	80
Man.	CF	Diesel	1 775	2
		Diesel, avec restrictions*	5 400	4
		Inconnu	0	1
Total – Man.			7 175	7
T.-N.-L.	CF	Diesel	20 993	24
		Inconnu	525	2
	Hybride	Diesel	2 775	1
	s/o	s/o	0	1
Total – T.-N.-L.			24 293	28
T.N.-O.	CF	Diesel	49 559	22
		Gaz naturel	2 120	1
		Gaz naturel/diesel	12 380	1
	Hydroélectricité	Diesel	27 660	1
		Diesel en appoint	6 150	1
	Réseau local	Diesel en appoint	16 812	5
s/o	s/o	0	3	
Total – T.N.-O.			114 681	34
Nt	CF	Diesel	50 295	25
	s/o	s/o	0	1
Total – Nt			50 295	26
Ont.	CF	Diesel	21 040	21
		Diesel, avec restrictions*	2 400	3
		Inconnu	1 305	7
	Hybride	Diesel	825	1

Status of remote off-grid communities in Canada (Août 2011)

La Figure 4 donne un aperçu de la position des sites ou communautés éloignées du Canada.



Figure 4 : Page d'accueil de la base de données sur l'énergie dans les collectivités éloignées

Status of remote off-grid communities in Canada (Août 2011)

2.1.2 Production électrique en site isolé

La demande en électricité des communautés isolées au Canada est sans cesse croissante au fil des années (Ibrahim, H., et al. 2010). Sachant que ces communautés utilisent essentiellement du diesel et le gaz naturel pour leur production électrique, l'augmentation du réchauffement climatique en est une conséquence directe. La production d'électricité par des générateurs diesel est passée de 567,4 GWh en 2019 à 622.5 GWh en 2020 (Ibrahim, H., et al. 2010). Cela pourrait s'expliquer par une augmentation de la population dans ces communautés, sans compter les stations de base, des stations météo, des installations agricoles ou même touristiques. Tout cela fonctionne au gaz naturel et au diesel pour des raisons économiques. Il est en effet économiquement injustifiable pour relier ces communautés au réseau de distribution principal. En plus, le transport du carburant pose de nombreux problèmes à cause d'un accès difficile au site, avec un risque de déversement lors du transport, et aussi son coût d'exploitation très élevé. Avec ces observations, il est

indispensable de penser à d'autres alternatives d'alimentation comme les énergies renouvelables, l'éolien, l'Hydro, la biomasse et le solaire.

2.1.3 Solutions proposées aux problèmes liés à l'électrification des sites isolés

Il est évident que l'insuffisance, voir l'absence d'électricité dans les zones isolées pose problème, car l'indice de développement d'un pays en général en dépend. Pour réduire la dépendance au diesel et réduire son coût d'exploitation en zone isolée, plusieurs études ont été menées, une des solutions les plus prometteuses est le jumelage éolien-diesel avec un stockage d'air comprimé (Lipman, N.H. 1994). En effet, le système consiste à faire une modélisation du système proposé, d'observer le résultat de l'énergie produite en même temps que celle stockée. Ce système a fait ses preuves en réalisant une économie significative sur les frais d'exploitation (97%), la réduction du temps d'utilisation du diesel de 50%, la réduction des gaz à effet de serre. Ici, une étude de faisabilité du projet sur plusieurs sites a été simulée avec le logiciel HOMER. Une étude qui permet aux chercheurs de mieux se situer sur la production d'énergie renouvelable et d'accroître le taux de pénétration des panneaux solaires. La combinaison solaire-éolien-géothermie diesel est aussi une solution tout aussi importante d'après les résultats obtenus de (Ismail, M., et al. 2014).

2.1.4 Les obstacles liés à l'utilisation des générateurs diesel en sites isolés

Le véritable problème lié à l'utilisation du générateur diesel, est son coût d'exploitation (Hunter R., E.G 1994). De plus, il a été démontré que l'utilisation des groupes diesel avec une faible charge contribue de manière irréfutable à réduire leur durée de vie. Par la même occasion cette utilisation augmente la consommation en mazout par lubrification insuffisante, d'où l'importance de garder le facteur d'utilisation des générateurs diesel au-delà de 30%(Richard, L. 2018). Aussi, selon que le site ou la communauté est accessible ou non par voie terrestre, fluviale ou aérienne, le prix du combustible est très supérieur à la normale, par comparaison au prix dans les grandes villes. Le remplacement des générateurs diesel par des solutions hybrides d'énergie renouvelable représente une solution qui répond à tous les critères, économiques, environnementaux.

2.2 ÉTUDES DES SYSTÈMES HYBRIDES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUES

2.2.1 Pourquoi l'hybridation ? Quelle est sa plus-value ?

Un système de production hybride d'énergie en général est un système qui combine et exploite plusieurs sources de production d'électricité (Hunter R., E.G 1994). Le terme hybridation peut avoir plusieurs définitions selon le contexte. Pour le cas des énergies renouvelables, un système d'énergie est dit hybride « s'il s'agit d'un système d'alimentation utilisant une source d'énergie renouvelable et une source d'énergie conventionnelle ou plus d'une source renouvelable avec ou sans sources d'énergie conventionnelles, fonctionnant en mode "autonome" ou "connecté au réseau" » ...On peut avoir deux types de sources d'énergie d'origine hybride (Hunter R., E.G 1994):

- Le système hybride connecté au réseau de distribution conventionnel, généralement plus fiable et robuste ;
- Un système hybride de production d'énergie sans connexion au réseau de distribution conventionnel (Figure 5), moins puissant que le premier type.

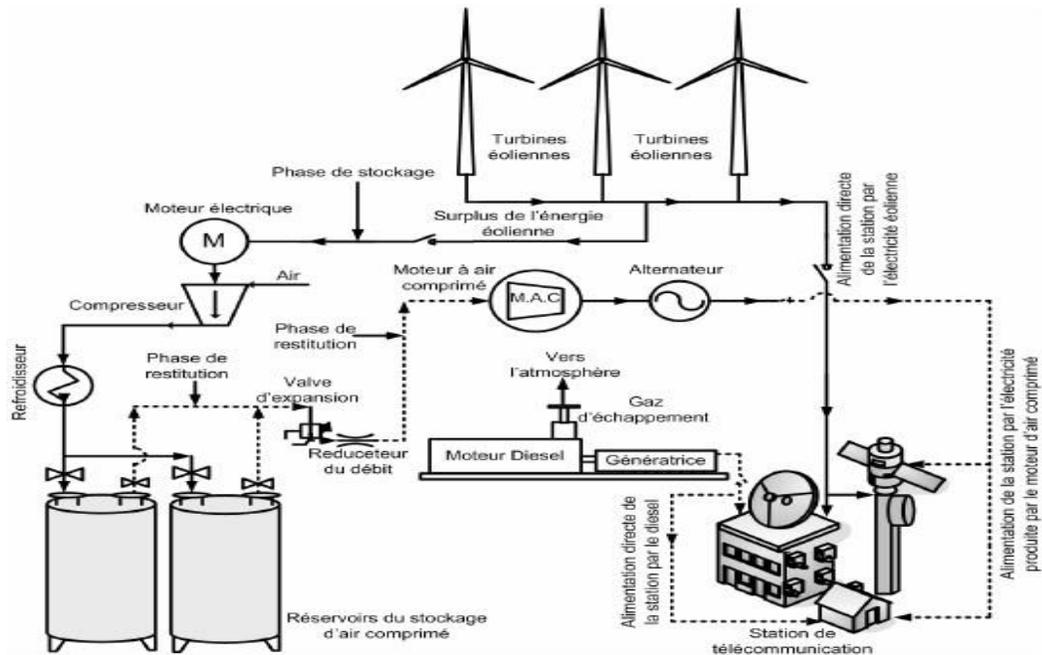


Figure 5 : Système hybride de type SHEDACPE (Hunter R., E.G 1994).

2.2.2 Pourquoi l'hybridation ?

Le rôle de l'hybridation est la manière de combiner plusieurs sources d'énergie de manière à compenser de manière stricte le manquement de production d'énergie pouvant provenir d'autres sources tout en optimisant le système tout entier, d'un point de vue financier et technique (Richard, L. 2018). Supposons que les éoliennes ne fonctionnent pas à cause de l'absence de vent ou tout autre problème mécanique. Si le système est associé aux panneaux solaires, l'électricité peut être compensée par celle provenant des panneaux solaires. De plus, si les panneaux sont incapables de produire la totalité d'énergie qu'il faut, les groupes électrogènes ou même les batteries peuvent fournir l'énergie de manière que la charge continue de recevoir l'énergie nécessaire pour son fonctionnement (Bruno E 2010).

2.2.3 Éléments d'un système hybride (solaire-éolien diesel-batterie)

➤ Les panneaux solaires

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie reçue par les panneaux solaires et transformée en électricité grâce au soleil. La cellule photovoltaïque est responsable de la conversion du rayonnement solaire incident en énergie électrique. Donc plusieurs cellules photovoltaïques forment le panneau photovoltaïque, en des montages de types série ou parallèles, ou même les deux types combinés (Ludmil, S. 2011). Cette association permet d'augmenter la taille des panneaux solaires, et donc la puissance. Une lamelle de silicium monocristallin est utilisée pour la cellule solaire. Cette cellule est un semi-conducteur constitué d'une couche négative(n) et d'une autre positive (p), l'ensemble forme donc ce que l'on appelle une jonction p-n (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

C'est ainsi qu'un regroupement de 30 à 40 cellules pourrait produire jusqu'à 12 V.

En 1999, on pouvait approximativement avoir une électricité mondiale venant du solaire autour de 200 MW, la vente pouvant coûter jusqu'à 3 milliards de dollars. En 1985, cette production était estimée à 23 MW, nous pouvons remarquer qu'après 14 ans il y a eu une explosion en termes d'installation des systèmes photovoltaïques. On va constater vers

les années 2000, une capacité de production électrique par l'intermédiaire du solaire a environ 1000 MW (Leng et Coll. 2000).

Les systèmes photovoltaïques ont beaucoup progressé ces dernières années, en termes de coût d'achat des PV et les coûts d'investissement diminuant de 1\$/kW à environ 0.35\$/kW installé. Dans la même lancée, d'après le rapport de CANSIA de 2016, les coûts liés au PV diminueront de moitié en 2025.

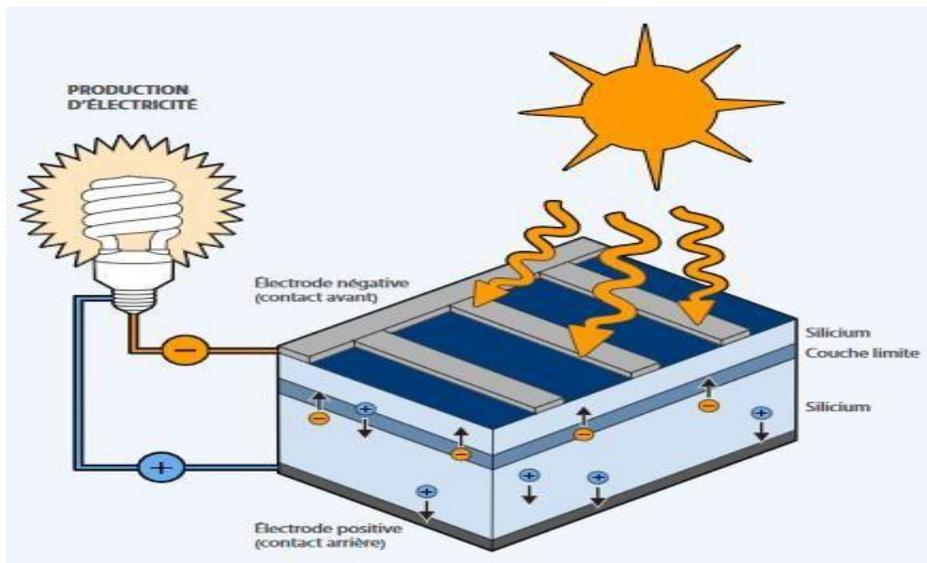


Figure 6 : Principe de production d'électricité (Richard, L. 2018)

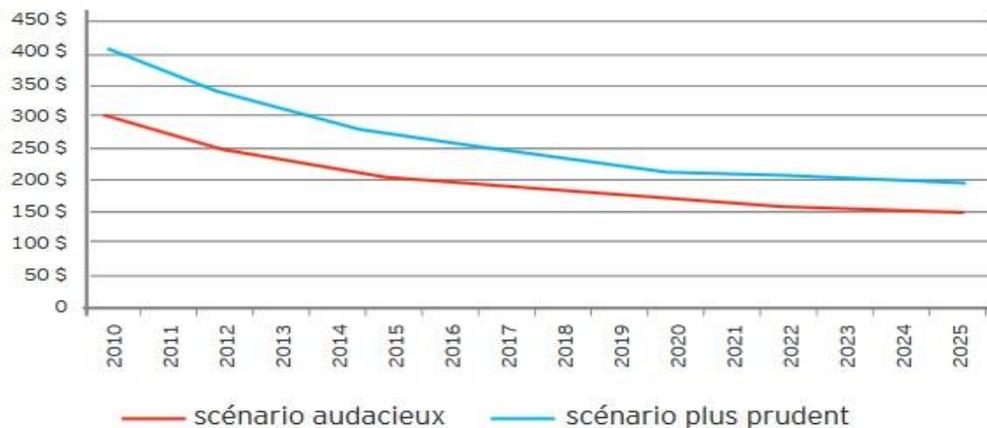


Figure 7 : Coût de la production de l'énergie solaire PV (\$/MW) (Leng et Coll. 2000)

• L'énergie éolienne

L'énergie du vent ou énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe.(Ilinca, A. 2017).

Cette énergie n'est pas optimale partout, il est plus intéressant d'installer une éolienne sur les côtes, dans les zones dégagées ou même sur les rives du plan d'eau, ainsi que dans les zones montagneuses.

Malgré pas mal de problèmes observés, la production électrique de source éolienne connaît une forte croissance au fil des ans (Figure 8), soit environ 10 à 40%. Il y a eu un ralentissement notoire en 2013, mais de manière générale dans le monde, la progression d'installations reste robuste : la capacité de production électrique de source éolienne a atteint 318 GW en 2013, soit une progression de 200 GW sur 5 ans (CDE Mars 2020).

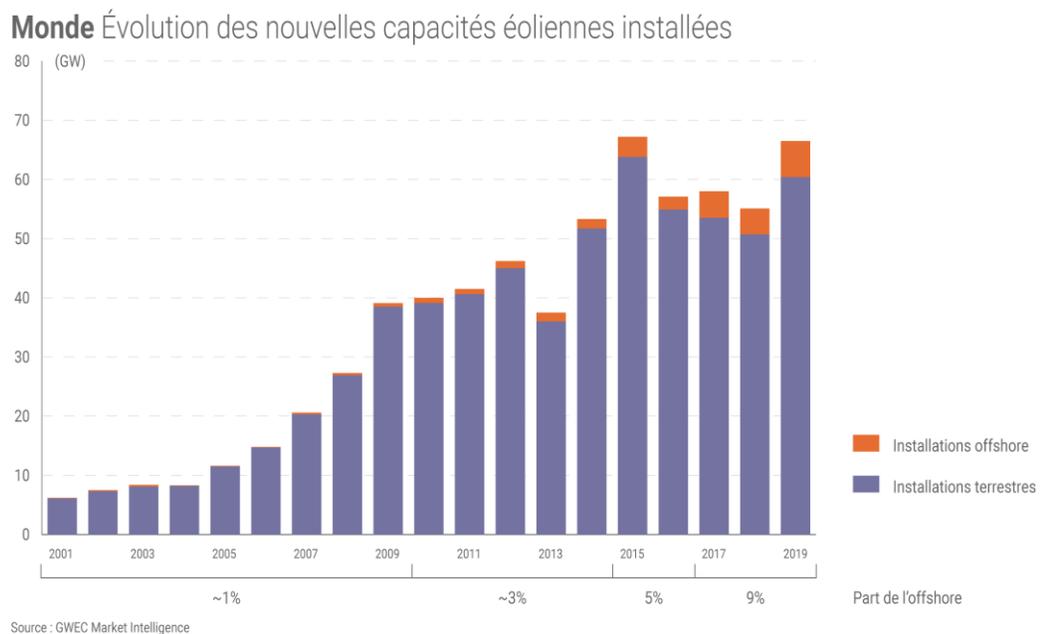


Figure 8: Puissance éolienne installée dans le monde (CDE Mars 2020).

En 2014 seulement, la capacité installée en énergie éolienne dans le monde était de 50 GW, ce qui était un record pour une année dans le monde, soit 40% de plus qu'en 2013 (Ilinca, A. 2017).

Le marché actuel de l'énergie renouvelable par les éoliennes est spécifique à chacun des pays avec un développement plus marqué en Chine, aux États-Unis, en Allemagne, Inde, Espagne et Angleterre, avec la Chine comme leader (CDE Mars 2020).

Nous pouvons constater que le Canada ne brille pas par son absence au rang des 6 premiers pays producteurs d'énergie éolienne. Il dispose pourtant de l'un des potentiels éoliens les plus importants au monde. Dans les régions nordiques, à l'exemple du Nunavik, on peut estimer un potentiel éolien pouvant fournir 40% des besoins en électricité au Canada, qui occupe actuellement le 9^e rang mondial (CDE Mars 2020). Néanmoins, des progrès sont en cours de réalisation selon l'Association canadienne de l'Énergie éolienne (CANWEA), qui a adressé ses félicitations à l'Alberta Energy System Operator (AESO) et son gouvernement pour la mise en place de la première partie du calendrier de la province sur les énergies renouvelables via les éoliennes au plus bas prix jamais obtenu dans le pays.

La Figure 9 montre la configuration typique d'une éolienne à axe horizontal. Il existe également des éoliennes à axe vertical, mais ce type de machine n'est pas aussi répandu que celles à axe horizontal dans les projets mis en œuvre dans le monde.

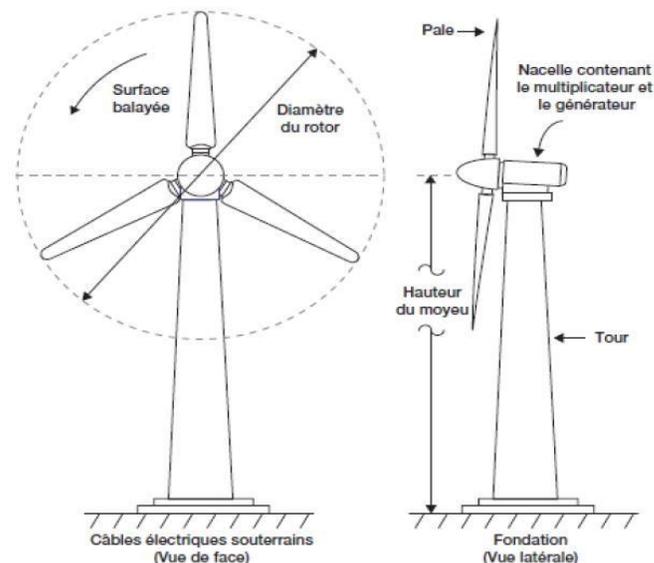


Figure 9 : Schéma d'une éolienne (Richard, L. 2018)

• Le générateur diesel

Le générateur diesel est une combinaison du moteur diesel et générateur électrique pour la production d'électricité. Il peut fonctionner au diesel comme à d'autres carburants liquides, ou même au gaz naturel. On retrouve le plus souvent les générateurs diesel principalement dans les régions ou communautés éloignées pour alimenter les centrales électriques. Nous pouvons faire ce constat au Canada, particulièrement dans le Nunavik, la Basse-Côte-Nord, en Haute Mauricie. Nous pouvons constater qu'à l'exception du Lac-Robertson qui est alimenté par hydroélectricité, toutes les autres centrales sont alimentées au diesel comme l'indique la Figure 10.

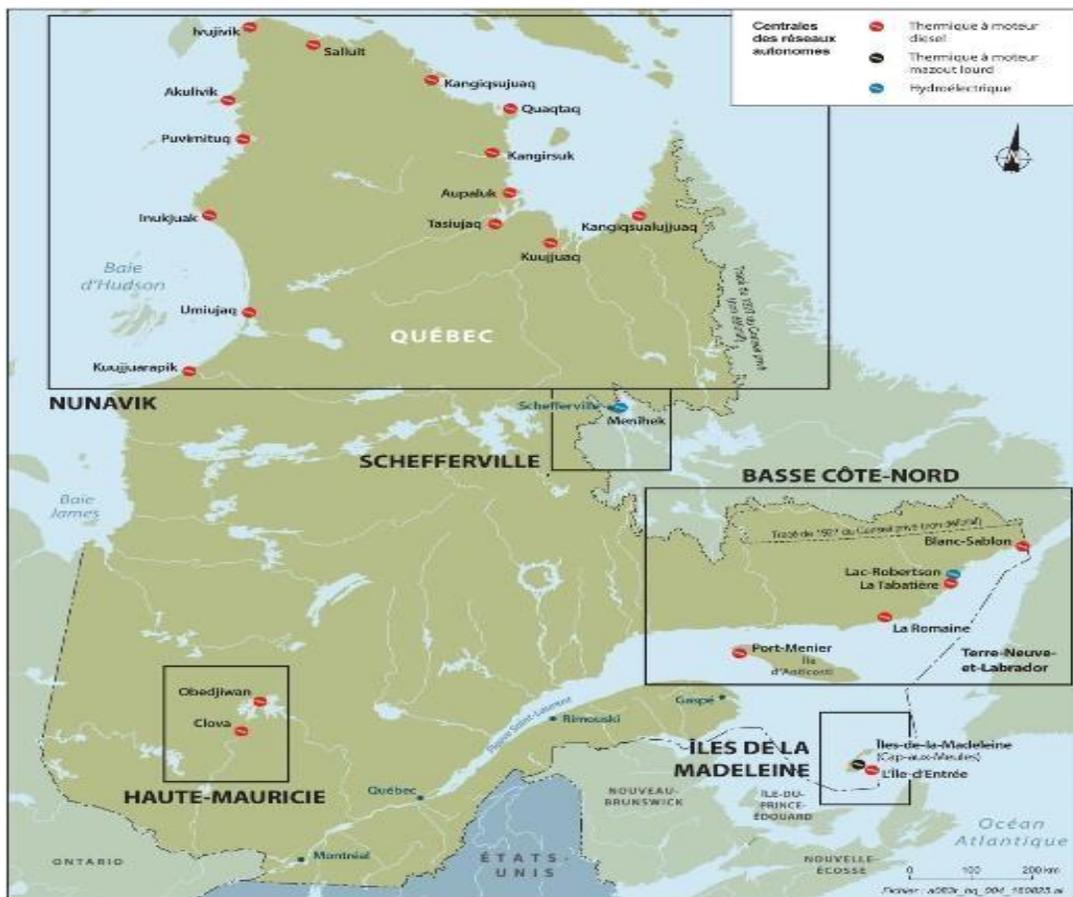


Figure 10 : Carte des réseaux autonomes alimentée par diesel (Québec, H 2017).

Il est important pour un générateur diesel pour son bon fonctionnement qu'il y ait une assurance en tout temps sur la qualité d'électricité délivrée, soit une tension stable ainsi que sa fréquence (René G, 2012). Pour ce faire, un régulateur de tension triphasé agit sur l'excitation des alternateurs synchrones pour s'opposer aux variations de la tension (Ibrahim, H.2010). Cela se fait couramment en ajoutant un autre signal qui est lié aux changements de la vitesse du rotor (Figure 11).

Avec la fréquence, c'est le même processus qui est observé, sauf que c'est la fréquence du courant alternatif à la sortie qui est maintenue par le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel (Ibrahim, H.2010).



Figure 11: Différentes parties d'un groupe électrogène (BOGRE, G.R. (2012))

- **Les batteries de stockages d'énergie**

Les technologies liées au stockage d'énergie sont des éléments très importants pour les systèmes modernes de production électrique, que ça soit pour les systèmes de distribution conventionnels ou pour les énergies renouvelables. Le stockage assure une certaine stabilité

dans le réseau de production au niveau de la tension et fréquence tout en étant une énergie fiable, assurant l'augmentation du taux de pénétration des énergies renouvelables (Akinyele, D.B., J. Levron, Y 2017). De tout ce qui précède, les éléments clefs favorisés par le stockage d'énergie sont (Landry, M. and Y. Gagnon, 2015):

- Augmentation du taux de pénétration des énergies renouvelables variables ;
- Augmentation de l'autoproduction et l'autoconsommation d'énergie ;
- Augmentation des possibilités d'utilisation d'énergie par les populations, surtout celles hors réseau ;
- Augmentation de la stabilité, la fiabilité et la résilience du réseau.

Connaissant que les systèmes de stockage nous permettent de sauvegarder de l'énergie pour éventuelle utilisation future, il existe plusieurs modes de stockages d'énergie (Tableau 3). Cependant il est reconnu que le dispositif de stockage le plus répandu ou le plus déployé pour les véhicules électriques en particulier sont des batteries (Figure 12).

Tableau 3 : Stockage d'énergie pour le support de réseau de transport et de distribution

Technology option	Maturity	Capacity (MWh)	Power (MW)	Duration (hours)	% Efficiency (total cycles)	Total cost (\$/kW)	Cost (\$/kWh)
CAES (aboveground)	Demo	250	50	5	(>10,000)	1950–2150	390–430
Advanced Pb-acid	Demo	3.2–48	1–12	3.2–4	75–90 (4500)	2000–4600	625–1150
Na/S	Commercial	7.2	1	7.2	75 (4500)	3200–4000	445–555
Zn/Br flow	Demo	5–50	1–10	5	60–65 (>10,000)	1670–2015	340–1350
V redox	Demo	4–40	1–10	4	65–70 (>10,000)	3000–3310	750–830
Fe/Cr flow	R&D	4	1	4	75 (>10000)	1200–1600	300–400
Zn/air	R&D	5.4	1	5.4	75 (4500)	1750–1900	325–350
Li-ion	Demo	4–24	1–10	2–4	90–94 (4500)	1800–4100	900–1700

Dunn, B., H. Kamath, and J.-M. Tarascon, (2011)

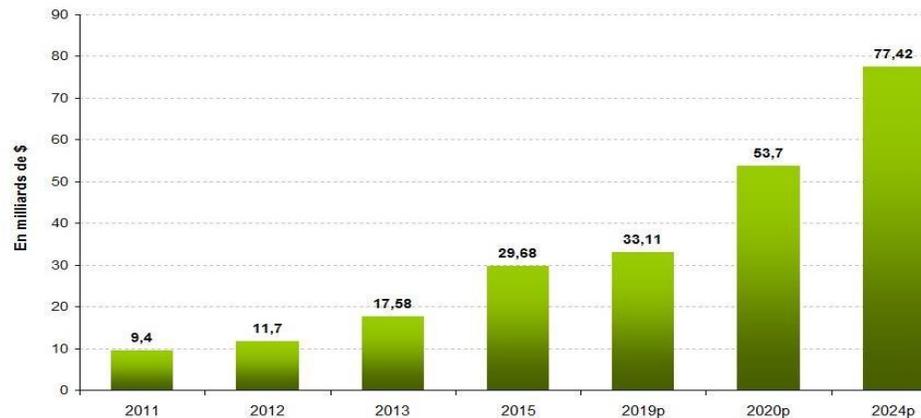
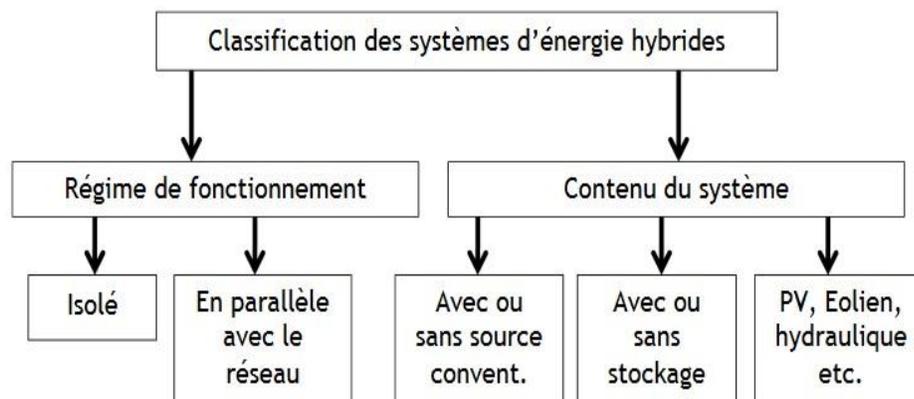


Figure 12: Marché mondial des batteries au Lithium-ion (Dunn, B, and J.-M. T,2011)

2.2.4 Répartition des systèmes hybrides de production électrique

Les systèmes de production d'énergie électrique multi-sources sont les plus prometteurs aujourd'hui pour assurer une certaine fiabilité et la disponibilité d'énergie en tout temps, partout où le besoin est nécessaire et à moindre coût. À cet effet, les classifications les plus répandues des systèmes hybrides sont les suivantes (Yannick, O. 2015) comme l'indique le Tableau 4.

Tableau 4 : Classification des systèmes d'énergie hybrides



(Yannick, O. 2015)

➤ **Selon le régime de fonctionnement**

Dans ce cas, nous verrons en général un système hybride de production relié au centre de distribution conventionnel, les deux fonctionnant en parallèle. Cette configuration peut être adoptée pour apporter un supplément d'énergie à la charge.

➤ **Selon le contenu du système hybride**

En effet, il est possible d'avoir un système hybride qui soit connecté ou pas au système de distribution conventionnel. Il pourrait y avoir ou non des dispositifs de stockages d'énergie.

➤ **Selon le degré de pénétration**

Ce type de classification tient compte en particulier du modèle hybride éolien-diesel dans les sites isolés. Cette classification a été effectuée selon trois niveaux (voir Tableau 5) :

Tableau 5 : Classification des systèmes éoliens-diesel basé sur le taux de pénétration

Niveau de pénétration	Caractéristiques de fonctionnement	Pénétration	
		Pic instantané	Moyenne annuelle
Faible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GD fonctionne sans arrêt ▪ La production éolienne réduit la charge du diesel ▪ Toute l'énergie éolienne alimente la charge principale ▪ Il n'y a pas de système de supervision 	< 50%	< 20%
Moyen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GD fonctionne sans arrêt ▪ Commande relativement simple ▪ Pour des niveaux élevés d'énergie éolienne, des charges secondaires sont réparties pour assurer une charge suffisante pour le diesel ou la production éolienne est réduite 	50% - 100%	20% - 50%
Élevé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GD peut être arrêté en fonction de la production éolienne ▪ Systèmes auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence ▪ Commande complexe 	100% - 400%	20% - 150%

Ce chapitre nous a permis de connaître les problématiques liées à l'utilisation de l'énergie en site isolé, de connaître les différentes solutions possibles et les différents éléments rendant cette implantation possible.

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET MODÉLISATION D'UN SYSTÈME HYBRIDE D'ALIMENTATION DU CAMP ESKER

3.1 INTRODUCTION

L'accès à l'électricité pour les personnes vivant dans des zones reculées est un défi majeur pour les fournisseurs d'électricité, compte tenu des coûts que cela implique lorsque l'installation est possible, mais avec une très grande perte d'énergie dans les transports (Maxim, T.2015). Les générateurs diesel sont encore utilisés dans le monde dans les zones isolées comme source d'énergie primaire. C'est le cas de notre site d'étude au nord du Québec, ce qui entraîne des coûts énormes sur le plan de la maintenance et une pollution de l'atmosphère. Il est donc important de penser à une alimentation électrique propre. Le générateur diesel est moins cher à l'achat, mais les coûts d'exploitation au cours de l'année deviennent rapidement très élevés pour une meilleure utilisation. Les réseaux électriques traditionnels sont généralement caractérisés dans des sites isolés par des investissements élevés, des délais de livraison élevés, des pannes fréquentes et une perte de transmission, ce qui se traduit par une qualité de service inférieure à la moyenne (Richard, L. 2018). Pour les sites accessibles uniquement par hélicoptère, le prix du transport du carburant augmentera de sorte qu'il sera difficile de récupérer les coûts d'investissement même à long terme, surtout si la hausse du prix du carburant et les éventuels crédits pour la réduction des gaz à effet de serre (GES) sont pris en considération. La plupart de ces stations sont situées dans des zones qui ont une bonne ressource éolienne et solaire. Cette ressource importante pourrait donc réduire les déficits d'exploitation en mettant l'accent sur l'énergie éolienne et solaire, le carburant local plutôt que le diesel, le carburant importé.

Dans le but d'avoir une configuration qui puisse associer les différentes sources d'énergie telles que le solaire et l'éolien, il nous faut d'abord faire une évaluation du potentiel éolien et solaire du site en question. Après avoir fait l'évaluation du potentiel du site, nous passerons à la modélisation avec le logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple

Energy Ressources), qui est un logiciel de simulation, d'optimisation et d'aide à la décision en énergie électrique hybride, pour prévoir la production d'énergie électrique sur un site donné pour avoir une configuration optimale.

3.1.1 Évaluation du potentiel éolien du site

Dans cette partie, il sera question des données nécessaires à l'étude avant de passer à l'évaluation du potentiel éolien.

3.1.2 Données nécessaires à l'étude

Afin de réaliser l'étude énergétique et économique pour le nouveau système d'électrification du camp Esker, nous utiliserons le logiciel HOMER qui permet d'établir différents scénarios en fonction des sources et des puissances choisies. Dans le cas de la mise en place d'un système hybride avec des éoliennes (en plus des génératrices diesel existantes), il est nécessaire de connaître le potentiel éolien du site, avec le plus d'exactitude possible. La bonne connaissance de ces données est primordiale pour s'assurer d'optimiser au mieux le ratio coût/puissance. De plus, l'utilisation du logiciel HOMER implique l'obtention de ces données pour effectuer les calculs comme on peut le voir sur la Figure 13.

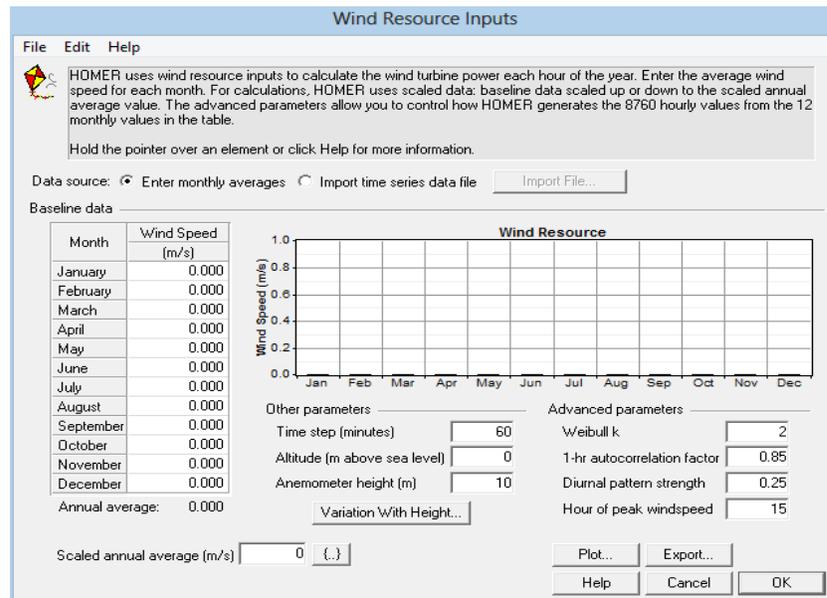


Figure 13 : Interface du logiciel HOMER

Les principales données à paramétrer dans le logiciel sont donc :

- Les moyennes des vitesses de vent mensuelles et annuelles ;
- La hauteur à laquelle ces vitesses ont été mesurées ;
- L'altitude du site ;
- D'autres paramètres plus techniques, notamment des choix des technologies de production d'énergie.

Le logiciel prend également en compte le coefficient de rugosité du site, ce qui lui permet de calculer automatiquement les vitesses du site à différentes hauteurs. La connaissance de ce coefficient est donc également nécessaire dans le cas où la hauteur de la tour de l'éolienne n'est pas la même que la hauteur de la mesure du vent (Figure 14).

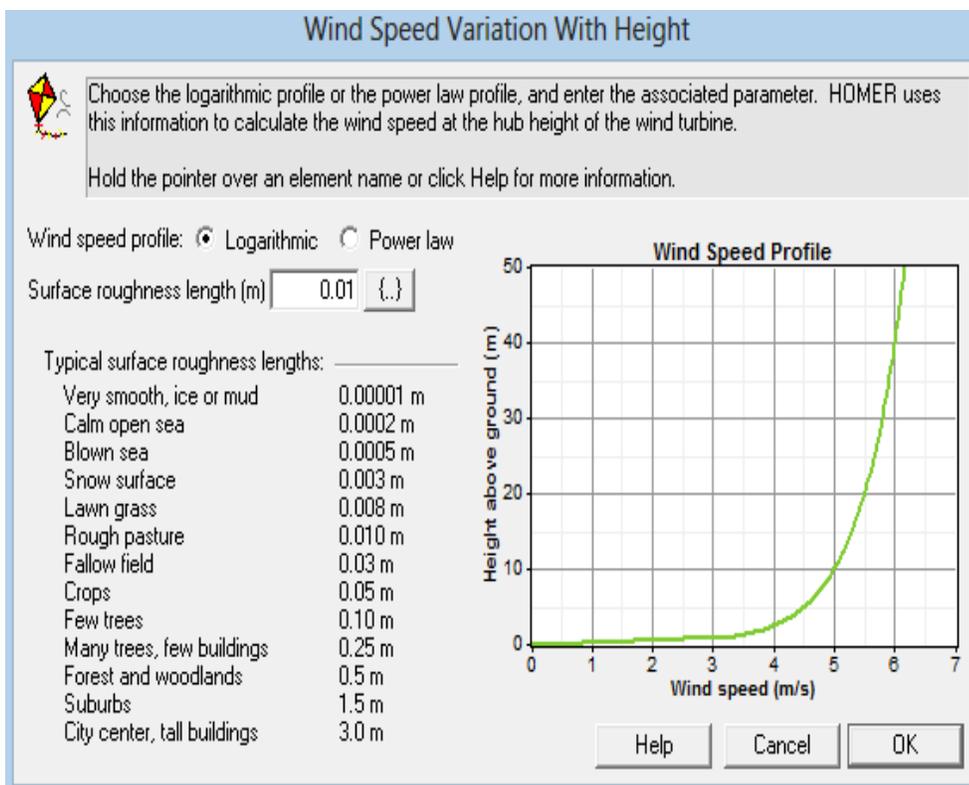


Figure 14 : Paramétrage de la rugosité du site

3.1.3 Estimation du potentiel éolien du site

Comme le site n'est actuellement pas muni d'un système de mesure de vent et qu'il n'y a aucune station météo d'Environnement Canada à proximité, seule une estimation du potentiel peut être effectuée. Nous verrons cependant que la réalisation d'une campagne de vent serait judicieuse pour s'assurer de la qualité des résultats. Nous allons faire une étude du potentiel éolien sur la région en utilisant des méthodes numériques afin de confirmer les données de vents utilisés dans cette étude. Cependant, compte tenu de la contrainte de temps, nous produisons un rapport basé sur des estimations conservatrices du vent. Dans le but d'obtenir une estimation du potentiel éolien la plus proche et crédible possible, nous avons réalisé des corrélations à l'aide de la station météo la plus proche : Schefferville (située à environ 70 km au nord d'Esger). De plus, nous avons utilisé deux sources de données existantes : l'Atlas éolien et le site d'Environnement Canada. Comme l'Atlas éolien fonctionne avec les coordonnées géographiques, cela nous a permis d'obtenir des informations sur le camp d'Esger que nous avons ensuite corrélées avec celles de Schefferville. Afin de mieux comprendre le travail et les corrélations effectués entre les sites et les bases de données, les parties suivantes visent à détailler les différentes informations récoltées :

3.1.2.1 Données de l'atlas éolien

En connaissant les coordonnées géographiques de la zone, le site de l'Atlas éolien du Canada permet d'obtenir les vitesses moyennes de vent annuelles et saisonnières à des hauteurs de 30 m, 50 m et 80 m. Ainsi, pour le camp Esger et la ville de Schefferville, nous obtenons les données suivantes (Gouvernement du Canada, 2016):

➤ Camp Esker :

Tableau 6 : Données de l'Atlas éolien pour le camp Esker

Altitude(m)	30	50	80
Période	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Annuel	7,43	7,97	8,67
Hiver	8,7	9,34	10,11
Printemps	7,06	7,58	8,22
Été	6,17	6,62	7,19
Automne	7,93	8,51	9,26

➤ Schefferville :

Tableau 7 : Données de l'Atlas éolien pour Schefferville

Altitude (m)	30	50	80
Période	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Annuel	7,32	7,98	8,77
Hiver	8,54	9,31	10,21
Printemps	6,91	7,53	8,25
Été	6,27	6,83	7,49
Automne	7,92	8,64	9,49

Ces données sont intéressantes, mais l'altitude de mesure n'est pas la bonne si l'on souhaite les comparer avec celles d'Environnement Canada. En effet, ces dernières sont obtenues pour des mesures à 10 m du sol. Il est donc nécessaire de calculer les vitesses de vent pour une altitude de 10 mètres. Pour ce faire nous avons utilisé la formule suivante :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

- V : la vitesse de vent recherchée (m/s),
- V_0 : la vitesse de vent initiale choisie (m/s),
- H : la hauteur à laquelle nous cherchons la vitesse de vent (m),
- H_0 : la hauteur pour la vitesse initiale (m),
- α : le coefficient de rugosité du site.

Ne connaissant pas le coefficient de rugosité, nous avons d'abord cherché à le déterminer en utilisant les vitesses connues pour deux hauteurs différentes (30 m et 50 m). Ainsi nous avons obtenu :

- $\alpha = 0,14$ pour le camp d'Esker
- $\alpha = 0,17$ pour Schefferville.
-

Avec la formule, nous avons déterminé les vitesses moyennes pour une altitude de 10 m :

- Camp d'Esker :

Tableau 8 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à 10 m pour l'Atlas éolien

Altitude m :	10
Période	Vitesse moyenne du vent m/s
Annuel	6,37
Hiver	7,46
Printemps	6,05
Été	5,29
Automne	6,8

- Schefferville :

Tableau 9 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à 10 m à Schefferville pour l'Atlas éolien

Altitude m :	10
Période	Vitesse moyenne du vent m/s
Annuel	6,07
Hiver	7,08
Printemps	5,73
Été	5,2
Automne	6,57

a) Données d'Environnement Canada

Le site d'Environnement Canada permet d'obtenir des informations météorologiques pour les années antérieures et pour des intervalles de temps choisis. Nous avons ainsi choisi de récolter les données heure par heure pour l'année 2010 et 2011 et d'en faire la moyenne ; nous estimons donc que cette moyenne représente la moyenne annuelle du site. De plus,

comme le logiciel Homer demande les données moyennes mensuelles, nous avons fait la moyenne pour chaque mois au Tableau 10.

Tableau 10 : Données Environnement Canada pour Schefferville

Année	2011	2010	Moyenne sur les deux ans
Altitude	10 m	10 m	10 m
mois	Vitesse moyenne du vent m/s	Vitesse moyenne du vent m/s	Vitesse moyenne du vent m/s
Janvier	2,9	5,18	4,04
Février	3,845	4,85	4,3475
Mars	4,53	3,66	4,095
Avril	4,61	4,55	4,58
Mai	3,9	3,86	3,88
Juin	3,52	4,13	3,825
Juillet	3,33	3,3	3,315
Août	3,51	3,6	3,555
Septembre	4,84	3,87	4,355
Octobre	3,73	3,87	3,8
Novembre	4,3	4,56	4,43
Décembre	4,59	3,83	4,21
Période	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Annuel	3,97	4,1	4,04
Hiver	3,76	4,56	4,16
Printemps	4,01	4,18	4,09
Été	3,89	3,59	3,74
Automne	4,21	4,09	4,15

À partir de ce Tableau, nous pouvons voir une première limite à nos estimations, car les données obtenues sont loin d'être les mêmes que celle de l'Atlas éolien

b) Corrélations entre les données d'Environnement Canada et de l'Atlas éolien

- Données mensuelles de Schefferville pour l'Atlas éolien :

Pour connaître les moyennes des vitesses de vent mensuelles de l'Atlas éolien, nous avons d'abord calculé le rapport des valeurs saisonnières entre les deux sources. Une fois le facteur de corrélation obtenu, nous l'avons appliqué sur chaque valeur mensuelle d'Environnement Canada. Ainsi, nous obtenons les nouvelles valeurs mensuelles correspondantes à l'Atlas éolien (Gouvernement du Canada, 2016) au Tableau 11 :

Tableau 11 : Données mensuelles estimées à Schefferville pour l'Atlas éolien

Altitude	10 m
Mois	Vitesse moyenne du vent m/s
Janvier	6,88
Février	7,4
Mars	6,97
Avril	6,41
Mai	5,43
Juin	5,35
Juillet	4,62
Août	4,95
Septembre	6,06
Octobre	6,02
Novembre	7,02
Décembre	6,67

- Données mensuelles du camp d'Esger pour l'Atlas éolien :

N'ayant pas les données mensuelles d'Environnement Canada pour le camp d'Esger, nous avons utilisé celles que nous connaissions de l'Atlas Éolien, que nous avons corrélée avec les données de Schefferville. Dans un premier temps, nous avons établi un facteur de corrélation entre les données initiales de l'Atlas éolien pour les deux sites. Ensuite, nous avons appliqué ce facteur de corrélation sur les données mensuelles de Schefferville estimées pour l'Atlas éolien. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Tableau 12 : Données mensuelles estimées au camp d'Esger pour l'Atlas éolien

Altitude	10 m
mois	Vitesse moyenne du vent m/s
Janvier	7,23
Février	7,78
Mars	7,33
Avril	6,77
Mai	5,73
Juin	5,66
Juillet	4,69
Août	5,02
Septembre	6,15
Octobre	6,23
Novembre	7,26
Décembre	6,9

- Données mensuelles du camp d'Esger pour Environnement Canada :

Pour obtenir ces valeurs, il suffit de réaliser le raisonnement inverse à celui de Schefferville. Puisque nous avons déjà calculé le facteur de corrélation entre l'Atlas éolien et Environnement Canada, on l'utilise pour connaître les données mensuelles du camp d'Esger estimées pour Environnement Canada. Finalement nous obtenons :

Tableau 13 : Données mensuelles estimées au camp d'Esger pour Environnement
Canada

Altitude	10 m
mois	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Janvier	4,06
Février	4,37
Mars	4,12
Avril	4,6
Mai	3,9
Juin	3,85
Juillet	3,33
Août	3,58
Septembre	4,38
Octobre	3,82
Novembre	4,46
Décembre	4,24

3.2 ÉVALUATION DU POTENTIEL SOLAIRE SU SITE

Dans cette partie il sera question de l'évaluation du potentiel du site, mais avant cela nous ferons une description du logiciel Homer.

3.2.1 Description du logiciel Homer Pro

Le logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi-sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connectés ou non-connectés (« off-grid ») (KAOUTAR, B. 2017). Il a été développé en premier lieu par le National Renewable Energy Laboratory dépendant lui-même du ministère américain de l'énergie. L'entreprise HOMER Energy LLC a été spécialement créée pour sa commercialisation et la suite de son développement.

Les fonctionnalités principales de cet outil sont les suivantes (KAOUTAR, B. 2017) :

- Prise en compte de profil de charge horaire ainsi que de charges pilotables (ballon d'eau chaude, etc.) ;
- Simulation horaire d'un système de production multisource. Homer est capable de simuler le comportement de nombreux équipements de production (PV, éolien, hydroélectrique, générateur, biomasse, diesel, huile végétale) ou de stockage (électrochimique, volant d'inertie, pile à combustible) ;
- Optimisation économique du système de production par comparaison de plusieurs configurations et architectures ;
- Analyse de sensibilité par rapport à certains paramètres d'entrée (prix des hydrocarbures, durée de vie des modules, gisement solaire, charge).

L'utilisateur obtient l'architecture et la configuration la plus économique selon la modélisation d'HOMER. C'est donc un outil d'aide à la décision pour le dimensionnement d'un mini-réseau.

L'énergie solaire photovoltaïque est la deuxième source renouvelable à envisager pour l'hybridation électrique du camp. Dans une utilisation éventuelle de panneaux photovoltaïques, il est primordial de connaître le plus précisément possible le potentiel solaire du site.

Contrairement au potentiel éolien, il est plus facile d'obtenir les données du gisement solaire grâce à différents organismes comme Environnement Canada ou la NASA dès lors qu'on le connaît les coordonnées géographiques du site. De plus, quelle que soit la base de données utilisée, nous avons observé que les chiffres moyens étaient sensiblement les mêmes, rendant ces données fiables pour la réalisation de nos simulations.

Le logiciel HOMER permet d'incorporer les données de gisement solaire souhaitées. En lui indiquant les coordonnées géographiques, celui-ci permet de générer directement le potentiel solaire en utilisant les données de la NASA (Figure 15). Les données que nous utilisons sont les suivantes :

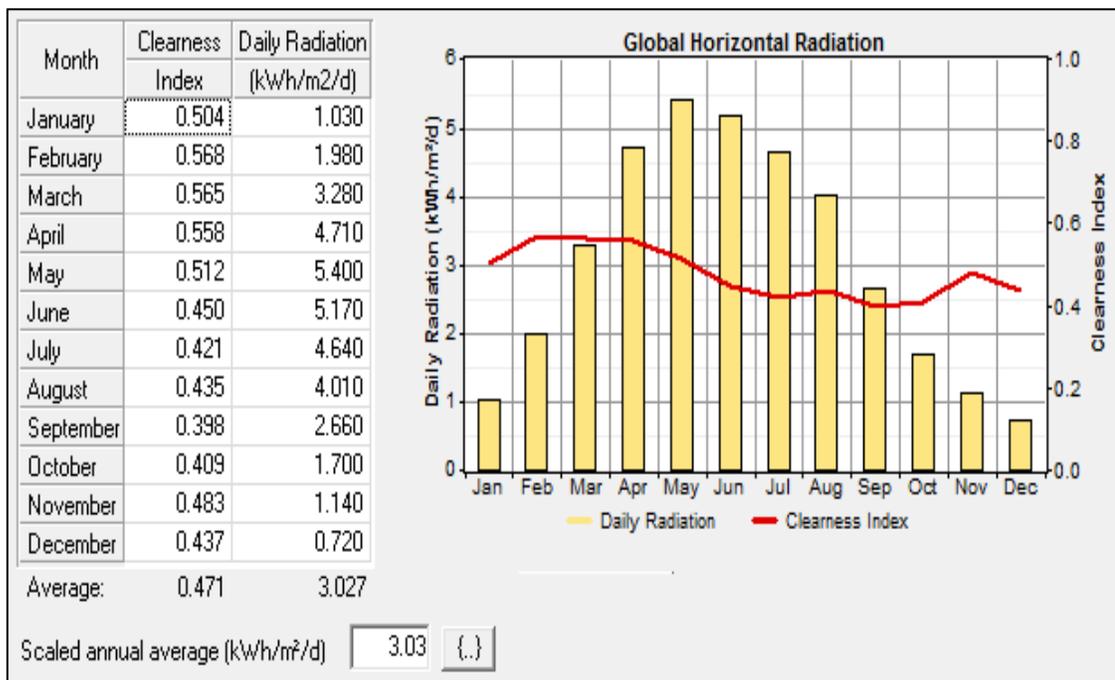


Figure 15 : Gisement solaire du camp Esker

Au vu de tout ce qui précède concernant l'analyse du potentiel éolien et solaire du site, nous concluons que le site possède une ressource en énergies renouvelables non négligeable. À présent, avec le logiciel Homer, nous ferons la modélisation et nous parlerons des différents éléments de notre système hybride et la configuration optimale.

3.3 SIMULATIONS AVEC HOMER

Dans cette partie nous ferons une simulation avec le logiciel HOMER, mais avant cela nous ferons un point sur le système actuel au camp Esker.

3.3.1 Système actuel au camp Esker

Rappelons que les besoins électriques du camp Esker sont satisfaits avec une capacité de générateur diesel de 150 kW moyennant des coûts d'exploitations pour l'énergie actuellement à 350 318 \$ par année.

3.3.2 Système proposé

Étant donné que notre but pour ce projet est d'aller vers une forte intégration des énergies renouvelables, nous proposons pour une première étude d'ajouter 6,0 kW de production solaire, 30 kW de capacité de générateur, 50 kWh de capacité de batterie et 30 kW de capacité de production éolienne. Cela réduirait les coûts d'exploitation à 108 598 \$ l'année. Le système aura une vue globale comme la Figure 16.



Figure 16 : Système proposé

À la Figure 17, nous voyons l'écart entre les paramètres financiers du système actuel et du système proposé, comme le retour sur investissement, les bénéfices annuels, etc. :

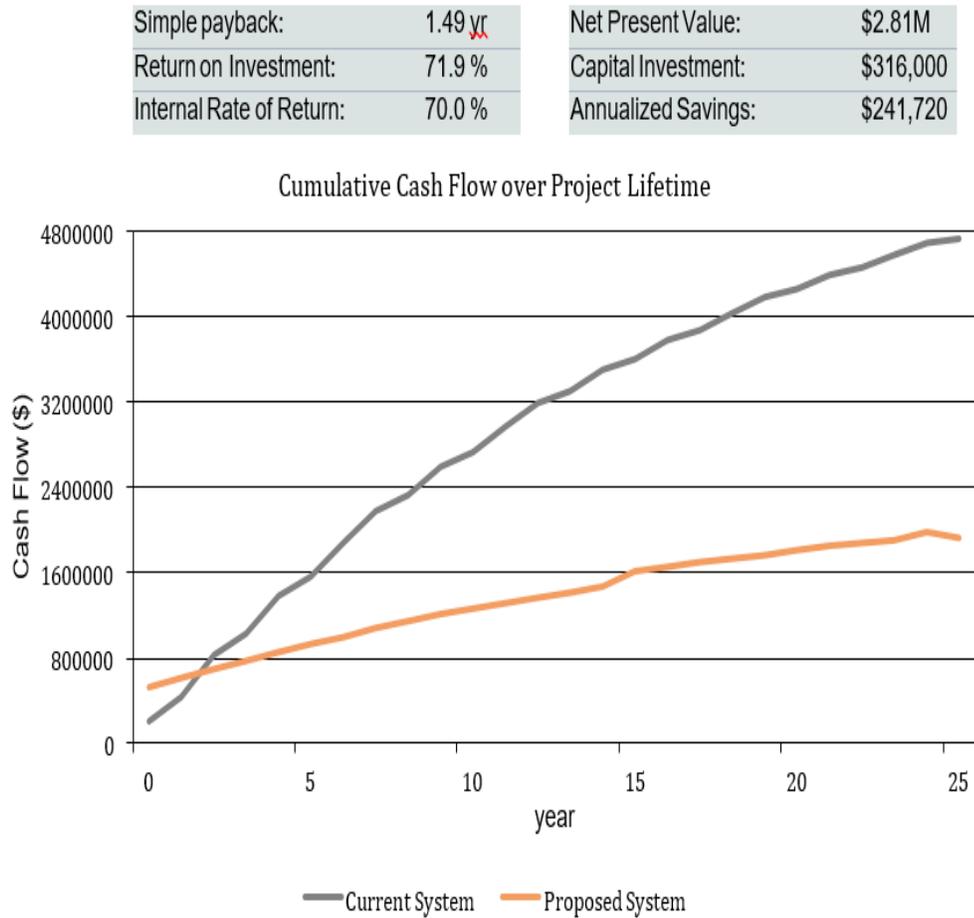


Figure 17: Système actuel et système proposé

Au vu des résultats de la Figure 17 nous pouvons constater une amélioration nette du système proposé par rapport au système actuel et un retour sur investissement assez conséquent.

3.3.3 Consommation électrique du camp

Le micro réseau a besoin de 331 kWh/jour et a une pointe de 50 kW. Dans le système proposé, les sources de production suivantes desservent la charge électrique. la Figure 18 montre les différents éléments du système proposé avec leurs pourcentages graphiques par rapport à la production de l'énergie.

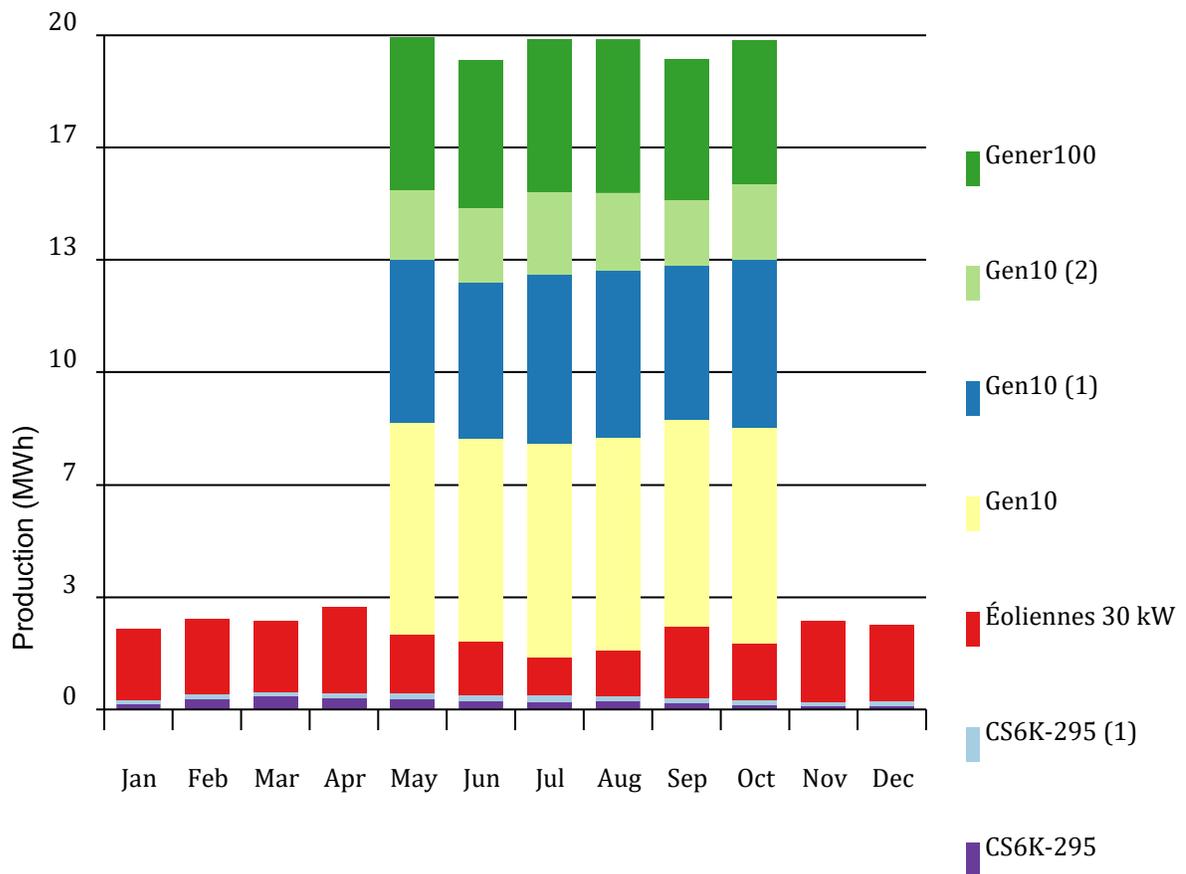


Figure 18 : Production de chaque source d'énergie durant l'année

À présent nous ferons une simulation des divers éléments du système avec leurs capacités de production par année, leurs coûts, etc.

3.3.2.1 PV: Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (sud)

Le système PV de Canadian Solar a une capacité nominale de 3,00 kW. Les panneaux sont fixés verticalement vers le sud. La production annuelle est de 3 383 kWh/an. Le Tableau 14 résume les différents paramètres des panneaux solaires qui seront orientés vers le sud et la Figure 19 la production journalière.

Tableau 14 : Paramètres du Canadian Solar Super Power CS6K-295MS

Rated Capacity	3.00 kW	Total Production	3,383 kWh
Capital Cost	\$3,000	Maintenance Cost	1,200 \$/yr
Specific Yield	1,128 kWh/kW	LCOE	0.423 \$/kWh
PV Penetration	2.78 %		

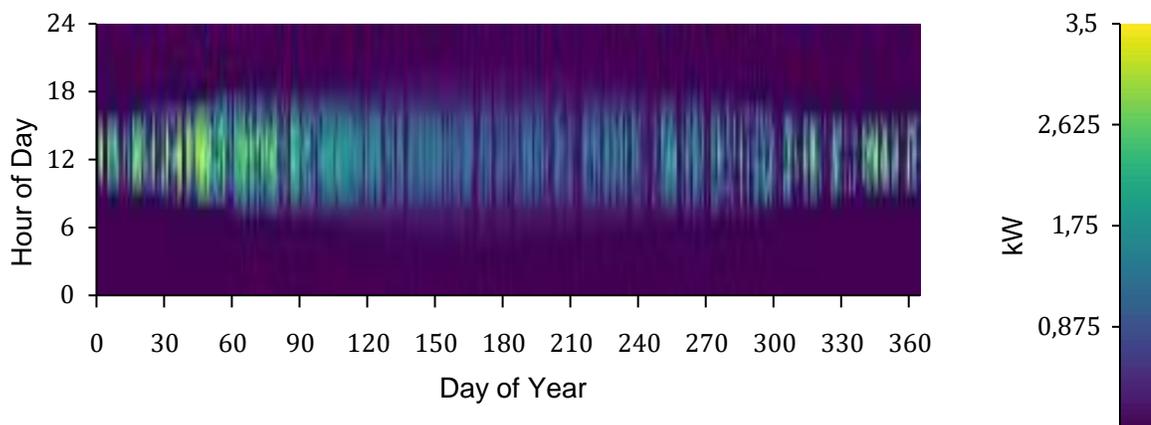


Figure 19 : Production journalière du panneau solaire CS6K-295MS

3.3.2.2 PV: Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (nord)

Le système PV de Canadian Solar a une capacité nominale de 3,00 kW. Les panneaux sont fixés verticalement vers le nord. La production annuelle est de 1151 kWh/an. Le Tableau 15 résume les différents paramètres des panneaux solaires qui seront orientés vers le sud et la Figure 20 la production journalière.

Tableau 15 : Paramètres du Canadian Solar Super Power CS6K-295MS (nord)

Rated Capacity	3.00 kW	Total Production	1,151 kWh
Capital Cost	\$3,000	Maintenance Cost	1,200 \$/yr
Specific Yield	384 kWh/kW	LCOE	1.24 \$/kWh
PV Penetration	0.945 %		

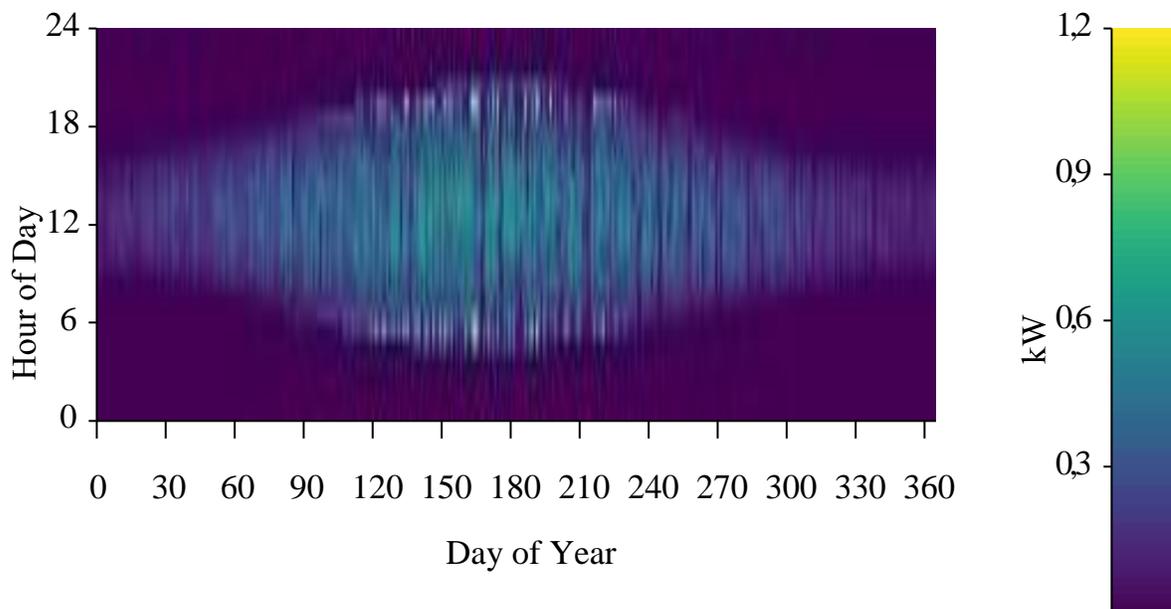


Figure 20 : Production journalière du panneau solaire CS6K-295MS(1)

3.3.2.3 Éoliennes de 30 kW

Les éoliennes font partie intégrante de notre nouveau système. La production d'énergie du système d'éoliennes, d'une puissance nominale de 30,0 kW, est de 23 268 kWh/an. Le Tableau 16 résume les différents paramètres des éoliennes de 30 kW et la Figure 21 la production journalière.

Tableau 16 : Paramètres des éoliennes de 30 kW

Quantity	10	Rated Capacity	30.0 kW
Wind Turbine Total Production	23,268 kWh/yr	Hours of Operation	8,760 hrs/yr
Capital Cost	\$50,000	Maintenance Cost	5,000 \$/yr
Wind Turbine Lifetime	20.0 years		

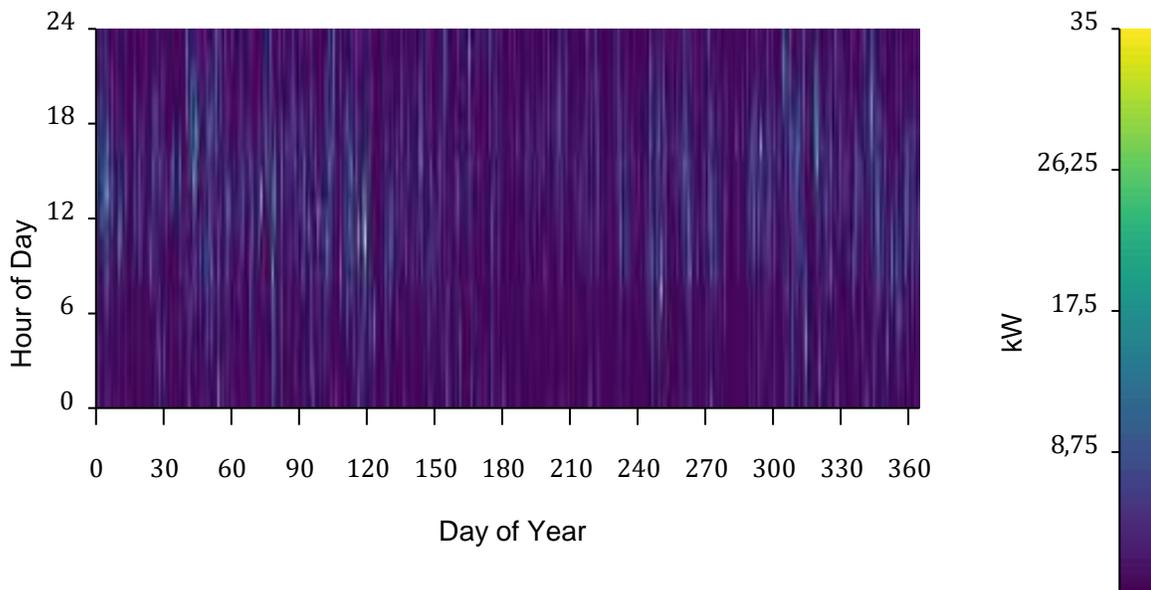


Figure 21 : Production journalière des éoliennes de 30 kW

3.3.2.4 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (Diesel)

La production d'énergie de la génératrice, d'une puissance nominale de 10,0 kW utilisant du diesel comme carburant, est de 37520 kWh/an. Le Tableau 17 résume les différents paramètres de la génératrice et la Figure 22 la production journalière.

Tableau 17 : Paramètres de la génératrice de 10 kW

Capacity	10.0 kW	Generator Fuel	Diesel
Operational Life	3.97 yr	Generator Fuel Price	2.00 \$/L
Capital Cost	\$12,000	Maintenance Cost	3,774 \$/yr
Fuel Consumption	12,542 L	Electrical Production	37,520 kWh/yr
Hours of Operation	3,774 hrs/yr	Marginal Generation Cost	0.572 \$/kWh
Fixed Generation Cost	2.63 \$/hr		

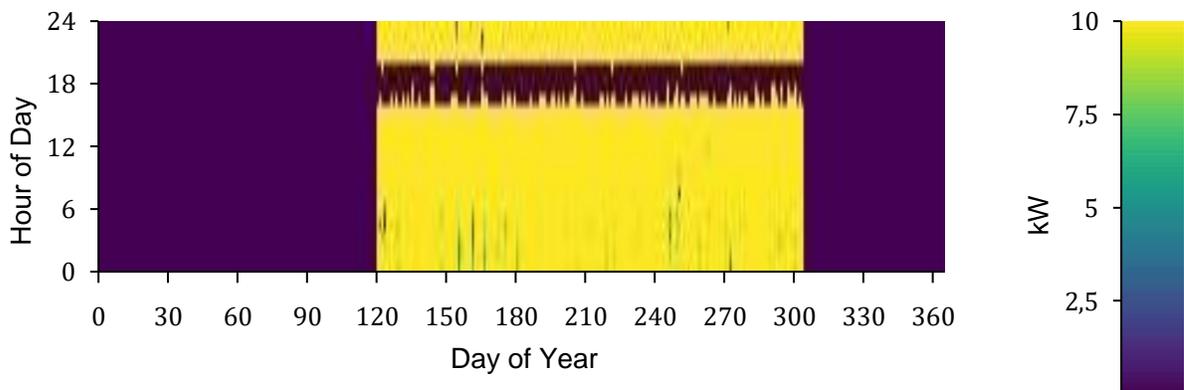


Figure 22 : Production journalière de la première génératrice de 10 kW

3.3.2.5 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (1) (Diesel)

La production d'énergie du système de générateur générique, d'une puissance nominale de 10,0 kW, utilisant du diesel comme carburant, est de 28 989 kWh/an. Le Tableau 18 résume les différents paramètres de la génératrice (1) et la Figure 23 la production journalière.

Tableau 18 : Paramètres de la génératrice de 10 kW (1)

Capacity	10.0 kW	Generator Fuel	Diesel
Operational Life	4.07 yr	Generator Fuel Price	2.00 \$/L
Capital Cost	\$12,000	Maintenance Cost	3,684 \$/yr
Fuel Consumption	10,059 L	Electrical Production	28,989 kWh/yr
Hours of Operation	3,684 hrs/yr	Marginal Generation Cost	0.572 \$/kWh
Fixed Generation Cost	2.63 \$/hr		

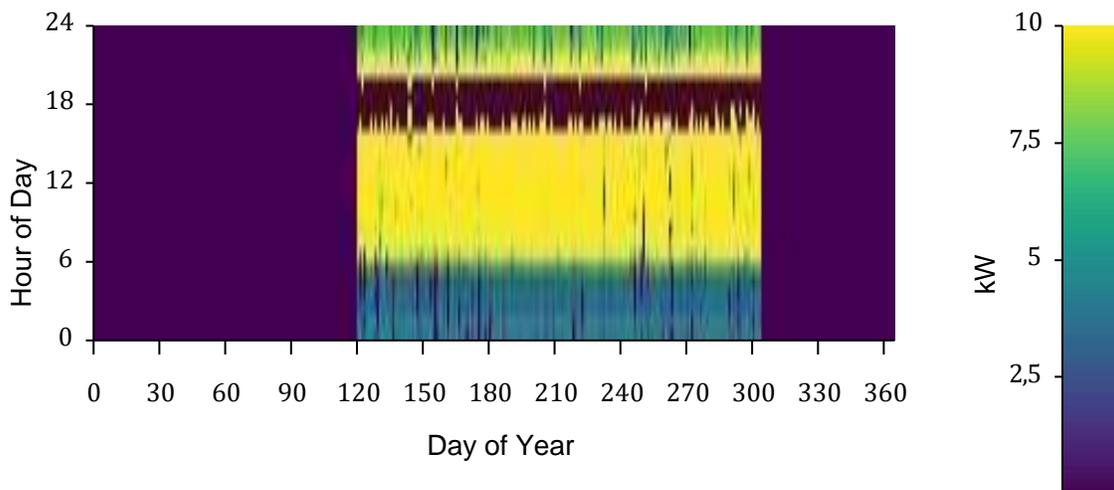


Figure 23 : Production journalière de la deuxième génératrice de 10 kW

3.3.2.6 Generator: Generic 10 kW Fixed Capacity Genset (2) (Diesel)

La production d'énergie de la génératrice, d'une puissance nominale de 10,0 kW utilisant du diesel comme carburant, est de 13 212 kWh/an. Le Tableau 19 résume les différents paramètres de la génératrice (2) et la Figure 24 la production journalière.

Tableau 19 : Paramètres de la génératrice de 10 kW (2)

Capacity	10.0 kW	Generator Fuel	Diesel
Operational Life	8.05 yr	Generator Fuel Price	2.00 \$/L
Capital Cost	\$12,000	Maintenance Cost	1,863 \$/yr
Fuel Consumption	4,673 L	Electrical Production	13,212 kWh/yr
Hours of Operation	1,863 hrs/yr	Marginal Generation Cost	0.572 \$/kWh
Fixed Generation Cost	2.63 \$/hr		

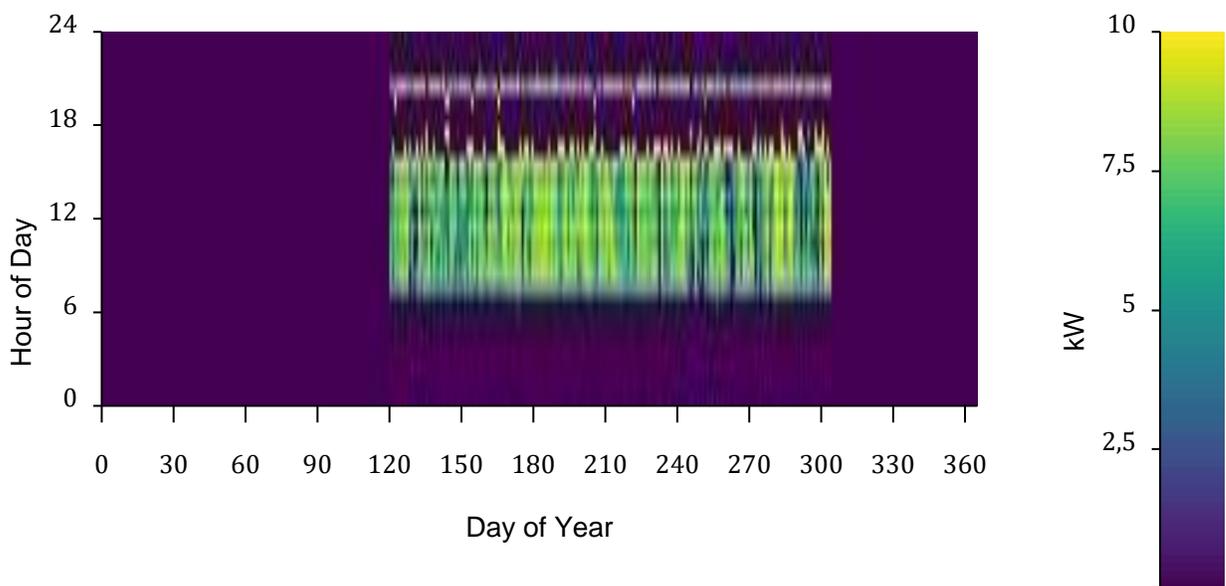


Figure 24 : Production journalière de la troisième génératrice de 10 kW

3.3.2.7 Generator: Generic 100 kW SD100 (Diesel)

La production d'énergie de la génératrice principale, d'une puissance nominale de 100 kW et utilisant du diesel comme carburant, est de 26 427 kWh/an. Le Tableau 20 résume les différents paramètres de la génératrice de 100 kW et la Figure 22 la production journalière.

Tableau 20 : Paramètres du générateur de 150 kW

Capacity	100 kW	Generator Fuel	Diesel
Operational Life	23.5 yr	Generator Fuel Price	2.00 \$/L
Capital Cost	\$200,000	Maintenance Cost	638 \$/yr
Fuel Consumption	8,993 L	Electrical Production	26,427 kWh/yr
Hours of Operation	638 hrs/yr	Marginal Generation Cost	0.529 \$/kWh
Fixed Generation Cost	20.6 \$/hr		

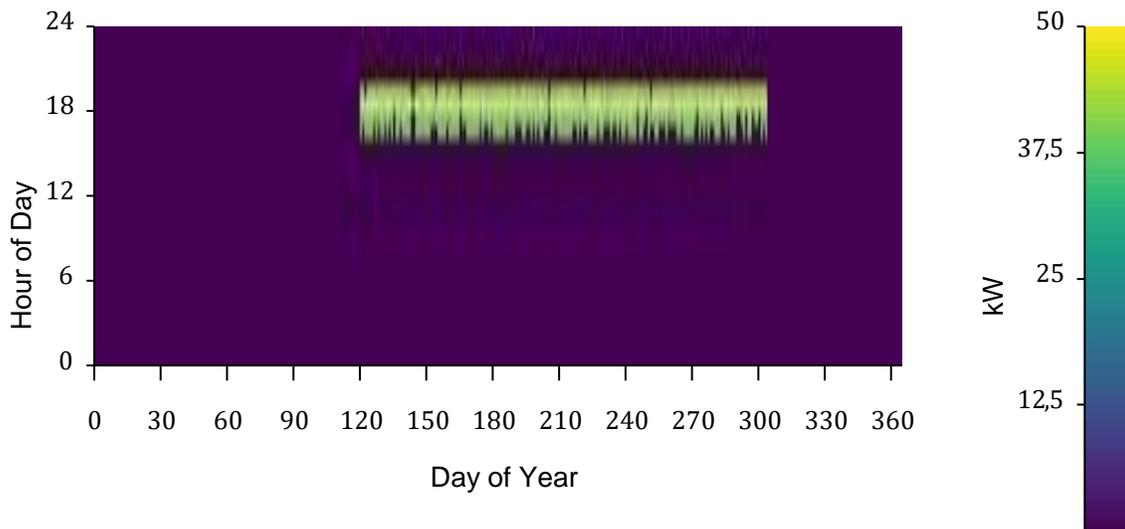


Figure 25 : Production journalière de la génératrice de 100 kW

3.3.2.7 Stockage : Discovery 6VRE-2600FD

La capacité nominale du système de stockage Discover Battery est de 105 kWh. Le débit annuel est de 861 kWh/an. Le Tableau 21 résume les différents paramètres du stockage et la Figure 22 la capacité de stockage journalière.

Tableau 21 : Paramètres du stockage de 105 kWh

Rated Capacity	105 kWh	Expected Life	7.00 yr
Annual Throughput	861 kWh/yr	Capital Costs	\$24,000
Maintenance Cost	2,667 \$/yr	Losses	192 kWh/yr
Autonomy	3.79 HR		

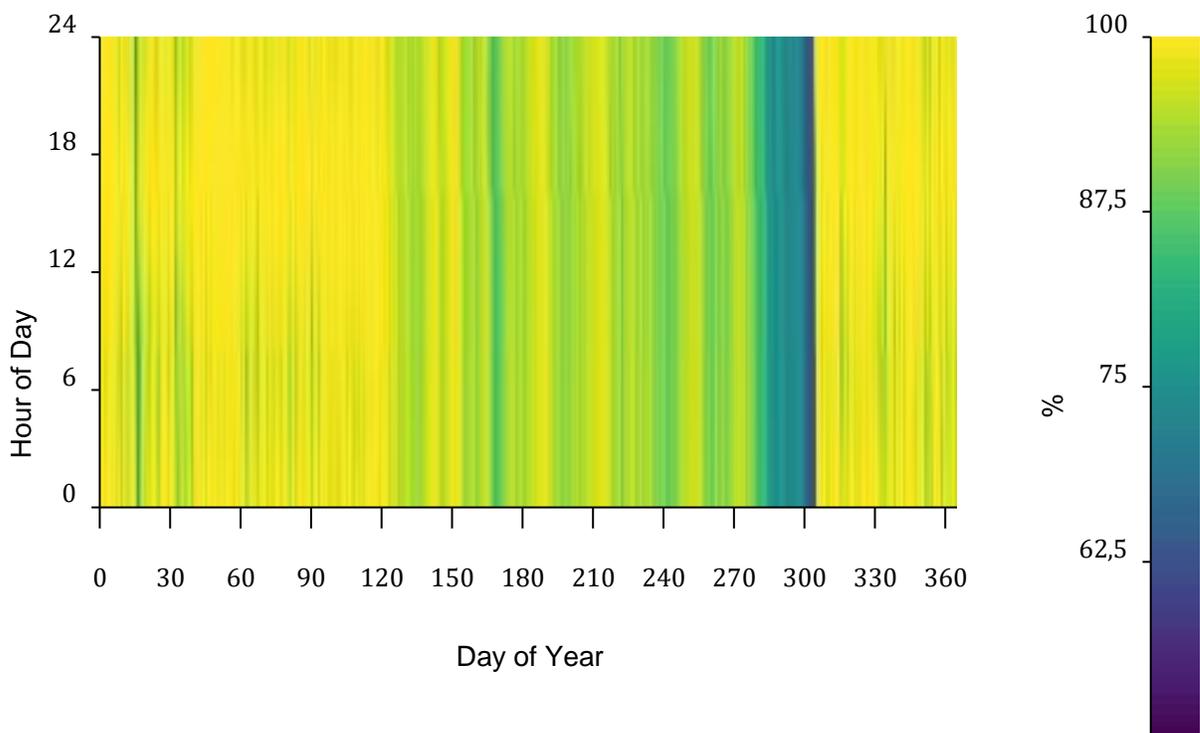


Figure 26: Capacité du stockage pendant la journée

3.3.2.8 Convertisseur ABB MG S100

Le Tableau 22 résume les différents paramètres du convertisseur et la Figure 27 l'énergie transitée à travers le convertisseur pendant la journée.

Tableau 22 : Paramètres du convertisseur ABB MG 100

Capacity	40.0 kW	Hours of Operation	8,652 hrs/yr
Mean Output	1.79 kW	Energy Out	15,642 kWh/yr
Minimum Output	0 kW	Energy In	16,465 kWh/yr
Maximum Output	29.1 kW	Losses	823 kWh/yr
Capacity Factor	4.46 %		

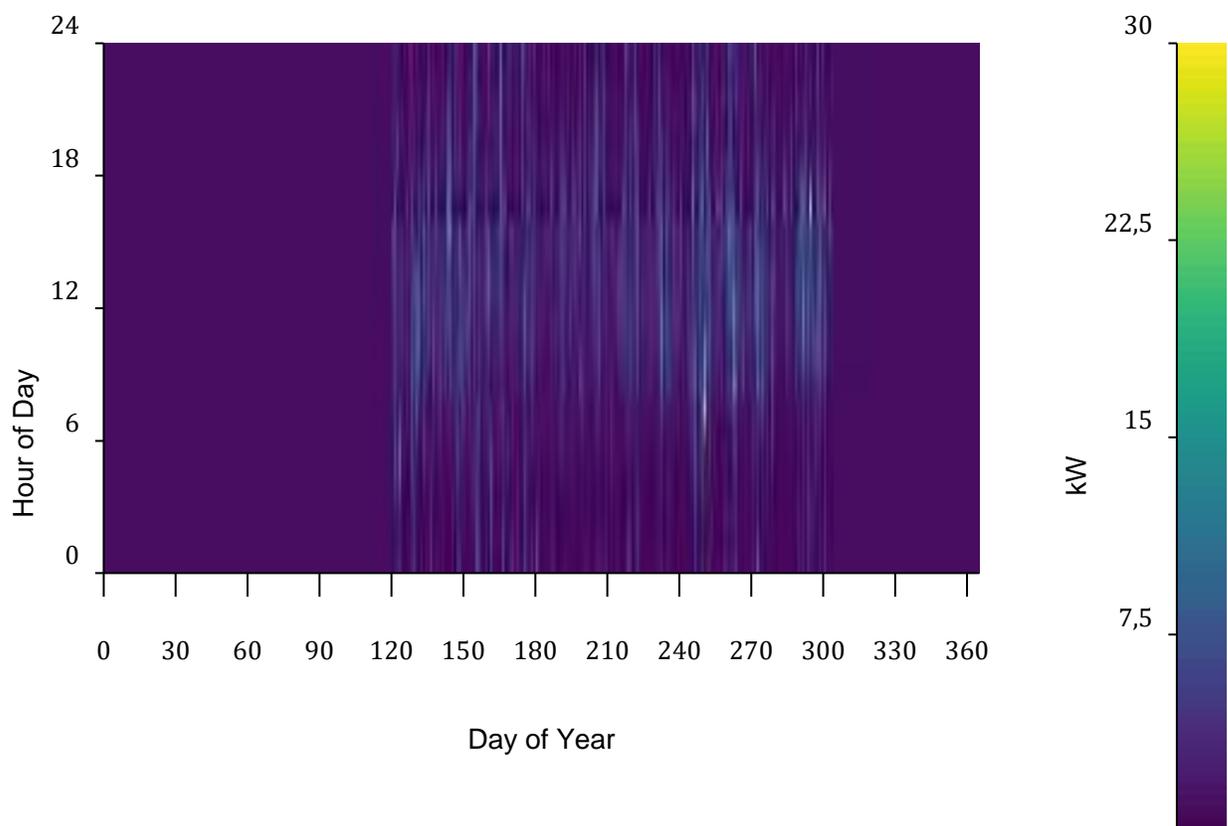


Figure 27 : Énergie transitée à travers le convertisseur pendant la journée

3.5 TECHNOLOGIE GREEN CUBE

Dans cette section il sera question de la technologie Green Cube développée par l'entreprise ATI.

3.5.1 Définition

Le Green Cube est une technologie développée par ATI (Audace Technologie inc.) qui offre des solutions énergétiques en site isolé en utilisant les énergies renouvelables notamment l'énergie solaire, l'énergie éolienne et d'autres sources comme une génératrice. Le Green Cube est une technologie qui ne nécessite pas l'installation de logiciels spécialisés pour fonctionner, en raison d'une erreur de manipulation. Une fois installé sur le site, il vous suffit de l'activer pour le faire fonctionner. Il a un autre avantage d'avoir des systèmes d'énergie renouvelable préinstallés, le montage PV est fait même pendant les périodes de neige. La technologie Green Cube qui est la propriété de la société Audace Technologies inc. comporte plusieurs modèles dont les principaux sont les suivantes :

- Le Green Cube GC-Max ;
- Le Green Cube GC-6 ;
- Le Green Cube GC-Mobile ;
- Le Green Cube GC-Volt.

3.5.2 Spécifications techniques

Les différentes spécifications techniques des Green Cube seront abordées à présent.

3.5.2.1 Le Green Cube GC Max

Les spécifications techniques du Green Cube GC-Max sont résumées dans le Tableau 23.

Tableau 23 : les Spécifications du Green Cube Max

GC MAX	
Structure	Conteneur marin 20 pieds
Nombre de panneaux solaires	12
Puissance solaire totale	5 kWc
Nombre d'éoliennes	Jusqu'à 3
Puissance totale d'éolienne	9 kWc
Hauteurs des mâts d'éoliennes	22 pieds
Stockage par batteries	Jusqu'à 300 kWh
Puissance de sortie maximale	12 kW
Production annuelle d'énergie maximale	38000 kWh
Type de sortie électrique	AC monophasé ou triphasé DC 12-48 V DC 48 V pour les applications télécoms
Génératrice diesel d'appoint	OUI : 7 à 11 kW avec un réservoir de 500 litres
Empreinte au sol (m ² par module)	18 m ²
Empreinte au sol (m ² par module)	Contrôle dynamique de la charge et des flux énergétiques.
Connectivité/Communication	Réseau local (MODBUS, SNMP), Réseau distant (TCP, GSM)

3.5.2.2 Le Green Cube GC-6

Les spécifications techniques du Green Cube 6 sont résumées dans le Tableau 24.

Tableau 24 : les Spécifications du Green Cube 6

GC 6	
Structure	Module en aluminium
Nombre de panneaux solaires	8
Puissance solaire totale	24 kWc
Nombre d'éoliennes	2
Puissance totale d'éolienne	2 à 6 kWc
Hauteurs des mâts d'éoliennes	Jusqu'à 18 pieds
Stockage par batteries	Jusqu'à 100 kWh Li-Ion par module
Puissance de sortie maximale	6 kW
Production annuelle d'énergie maximale	10000 kWh
Type de sortie électrique	AC monophasé ou triphasé DC 12-48 V DC 48 V pour les applications télécoms
Génératrice diesel d'appoint	OUI : 7 à 11 kW avec un réservoir de 500 litres
Empreinte au sol (m ² par module)	7 m ²
Empreinte au sol (m ² par module)	Contrôle dynamique de la charge et des flux énergétiques
Connectivité/Communication	Réseau local (MODBUS, SNMP), Réseau distant (TCP, GSM) Accès au Data logger localement par USB , enregistrement des données sur carte SD



Figure 28 : Green Cube GC-6

3.5.2.3 Le Green Cube GC-Mobile

Les spécifications techniques du Green Cube GC-Mobile sont résumées dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Les spécifications du Green Cube Mobile

Green Cube Mobile	
Structure	Module en aluminium
Nombre de panneaux solaires	3
Puissance solaire totale	12 kWc
Nombre d'éoliennes	1
Puissance totale d'éolienne	1 kWc
Hauteurs des mâts d'éoliennes	12 ou 20 pieds
Stockage par batteries	Jusqu'à 12 kWh Lithion ou AGM
Puissance de sortie maximale	2 kW
Production annuelle d'énergie maximale	3100 kWh
Type de sortie électrique	AC Monophasé 110/220V DC 5V USB DC 12- 48 V
Génératrice diesel d'appoint	OUI : 2 kW avec un réservoir de 50 litres
Empreinte au sol (m ² par module)	8 m ²
Empreinte au sol (m ² par module)	Contrôle dynamique de la charge et des flux énergétiques Optimisation continue de l'état des batteries (de -40 à 45° Celsius) Planificateur de maintenance
Connectivité/Communication	Réseau local (MODBUS, SNMP), Réseau distant (TCP, GSM) Accès au Data logger localement par USB , enregistrement des données sur carte SD



Figure 29 : Green Cube mobile

3.5.2.4 Le Green Cube GC-Volt

Les spécifications techniques du Green Cube GC-Volt sont résumées dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Les Spécifications du Green Cube-Volt

Green Cube Volt	
Structure	Module en aluminium
Nombre de panneaux solaires	Jusqu'à 4 (externes)
Puissance solaire totale	Jusqu'à 12 kWc
Nombre d'éoliennes	NA
Puissance totale d'éolienne	NA
Hauteurs des mâts d'éoliennes	NA
Stockage par batteries	5 kWh
Puissance de sortie maximale	NA
Production annuelle d'énergie maximale	2000 kWh
Type de sortie électrique	AC Monophasé 110/220 V DC 5V USB DC 12 V
Génératrice diesel d'appoint	NON
Empreinte au sol (m ² par module)	0.25 m ²
Empreinte au sol (m ² par module)	Contrôle dynamique de la charge et des flux énergétiques
Connectivité/Communication	Enregistrement des données sur carte SD



Figure 30 : Green Cube GC-Volt

3.5.2.5 Configuration des Green Cube à implanter

Dans la réalisation de ce projet, nous utiliserons

- 2 Green Cube Max connectés en parallèle et ;
- 3 Green Cube six connectés en parallèle.

3.6 MODIFICATION DE CERTAINS PARAMÈTRES CONCERNANT LA CONFIGURATION PROPOSE

La simulation avec le logiciel HOMER nous donne une vue approximative des paramètres des divers éléments de notre système. Mais pour la réalisation de ce projet, il va devoir s'ajuster avec les équipements disponibles sur le marché et faire un compromis avec la qualité et le coût pour mener à bien ce projet.

3.6.1 Regroupement des génératrices de 10 kW

La configuration optimale dans le logiciel HOMER prévoyait trois génératrices de 10 kW pour accompagner les autres types d'énergies à assurer la demande en énergie du camp, mais pour différentes raisons nous proposons une génératrice de 30 kW. Dans le tableau ci-après, nous développerons les raisons qui nous ont poussés à faire ce choix.

3.6.1.1 Avantages et inconvénients de trois génératrices de 10 kW

Le Tableau 27 présente les avantages et inconvénients de trois génératrices de 10 kW.

Tableau 27 : Avantages et inconvénients de trois génératrices de 10 kW

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Possibilité d'utiliser une ou deux éoliennes si la demande du camp est basse	<ul style="list-style-type: none">• Possibilité d'arrêt des éoliennes avant que le régime établi ne soit atteint• Encombrement dans la salle des machines• Maintenance périodique et coûteuse• Achat de synchronisateur pour avoir la puissance globale de 30 kW

3.6.1.2 Avantages et inconvénients d'une génératrice de 30 kW

Le Tableau 28 présente les avantages et inconvénients d'une génératrice de 30 kW

Tableau 28 : Avantages et inconvénients d'une génératrice de 30 kW

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Maintenance moins coûteuse• Possibilité d'atteindre le régime établi• Durée de vie plus longue• Pas d'encombrement dans la salle des machines• Le cout d'achat réduit par rapport au trois de 10 kW	<ul style="list-style-type: none">• Fonctionnement pratiquement en tout temps

Ce chapitre nous a permis d'avoir une idée sur la conception du système à installer, d'analyser les simulations du logiciel HOMER et de faire les ajustements par rapport aux équipements disponibles sur le marché.

CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DE LA CHARGE AU CAMP ESKER

4.1 INTRODUCTION

La caractérisation de manière générale est l'étude du comportement de la charge à n'importe quel moment afin de comprendre à quel moment le système est vulnérable en vue de prévoir d'éventuelles solutions. Dans notre cas précis au camp Esker nous allons d'abord faire un bilan énergétique des charges dans le camp et après faire une simulation pendant une année, heure par heure en combinant plusieurs sources pour voir quel est l'apport des énergies renouvelables et les différents scénarios pour avoir une meilleure configuration. Nous ferons principalement la simulation avec le logiciel Homer de 3 scénarios combinant plusieurs sources d'énergie.

4.2 BILAN ÉNERGÉTIQUE DES CHARGES À ESKER

Le Tableau suivant résume les différentes charges au camp Esker avec leurs divers paramètres comme la puissance et le temps de fonctionnement.

4.2.1 Charges existantes à Esker

Les charges existantes dans ce camp font partie des équipements que nous utilisons dans la vie de chaque jour comme :

- Les cuisinières ;
- Le chauffage ;
- Les réfrigérateurs ;
- Les climatiseurs ;
- Les pompes ;
- Les ventilateurs ;
- Les sécheuses, etc.

Le Tableau 29 résume ces équipements, leurs puissances et leur temps d'utilisation

Tableau 29 : Charges existantes à Esker

Équipements	Puissance	Temps-période de fonctionnement
1 Cuisinière électrique	10000 W	Jamais à pleine puissance, jamais la nuit (entre 7H et 8H; 11h et 13H)
1 Hotte de cuisinière	1000 W	2h/jour, jamais la nuit (de 11h à 13h)
3 Modules mobiles d'air climatisé	2500 W/unité	Uniquement jours de grande chaleur
25 Plinthes de chauffage électrique	1500 W/unité	Seules les chambres occupées, seulement lors des journées froides en Mai et Septembre.
4 Chauffe-eau	2x9000 W; 2x6000 W	utilisation selon le nombre de travailleurs occupants
2 Laveuses linge	1000 W/unité	1 fois/jour, 1 machine
2 Sécheuses	3000 W/unité	1 fois/jour, 1 machine
7 Frigidaires ou congélateurs	500 W/unité	Continu
2 Ventilateurs d'extraction (toilettes, ect ...)	300 W	2h/jour
Éclairage dans toutes pièces	2000 W total estimé	Continu
1 Station d'assainissement d'eau	2000 W	Intermittent, périodes de 10 minutes, pas la nuit.
1 Chauffage station d'assainissement	4000 W	Seulement en Mai et Septembre
1 Pompe submersible au lac	1000 W	Intermittent, selon nombre de travailleurs hébergés, séquences de 15 minutes 10 fois/jour
4 Ventilateurs de réchauffage antigél sous les modules	5000 W/unité	Seulement en Mai et Septembre
2 Câbles électriques antigél pour certains tuyaux sous les modules	400 W	Seulement en Mai et septembre
1 Pompe de transfert de carburant pour la génératrice.	500 W	1 fois, 15 minutes, chaque semaine
2 Pompes de transfert fosse septique	500 W/unité	10 fois/j, 5 minutes
4 Projecteurs extérieurs	(1000 W, 300 W, 300 W, 300 W)	1 continu, 3 autres nuits seulement

4.2.2 Énergie consommée par chacune des charges

Le Tableau 30 fait état de l'énergie consommée par chacune des charges. La formule utilisée est :

$$\text{Énergie} = (\text{Puissance} \times \text{Heures d'utilisation}) / 1000$$

Tableau 30 : Énergies consommées par chacune des charges

HEURES	Consommation quotidienne par équipement (kW)																	Total						
	1 Cuisinière électrique	2 cafetières commerciales	1 Hotte de cuisine	3 modules mobiles d'air climatisé	25 plinthes de chauffage électrique	4 chauffe-eau	2 laveuses à linge	2 sècheuses	7 frigidaires ou congélateurs	2 postes de télévision	1 poste de travail bureautique	2 fans d'extraction (toilettes, etc...)	éclairage dans toutes pièces	1 station d'assainissement d'eau	1 chauffe station d'assainissement	1 ée	4 fans de réchauffage antigels sous les modules		2 câbles électriques antigels pour certains tuyaux sous	1 pompe de transfert de carburant pour la génératrice	2 pompes de transfert fosse septique	4 Projecteurs extérieurs		
00:00	0	0	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,9	18,4
01:00	0	0	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,9	18,4
02:00	0	0	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,9	18,4
03:00	0	0	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,9	18,4
04:00	0	0	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1,9	30,4
05:00	0	0	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0	0,3	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1,9	1,9	35,083	
06:00	0	0	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0,125	0,083	1	1	34,008	
07:00	10	0	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	33,883	
08:00	10	1,5	0	0	0	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	0	0	0	0	0	1	31,63	
09:00	0	1,5	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	0	0	0	0	0	1	31,63	
10:00	0	0	0	0	10	15	1	3	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	0	0	0	0	0	1	34,13	
11:00	10	0	2	0	10	15	1	3	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0,25		0,4	0	0,083	1	1	46,863	
12:00	10	0	2	0	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	46,183	
13:00	10	0	2	2,5	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	48,683	
14:00	0	0	0	2,5	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	0	0	0	0	0	1	32,63	
15:00	0	0	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	0	0	0	0	0	1	30,13	
16:00	0	0	0	0	10	15	0	0	0,5	0	0,3	0	1	0,33	2	0	3,32	0	0	0	0	1	33,45	
17:00	0	0	0	0	10	13	0	0	0,5	0	0	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	31,883	
18:00	8	0	0	2,5	8	13	0	0	0,5	0	0	0,3	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	40,683	
19:00	8	1,5	0	2,5	8	13	0	0	0,5	0,3	0	0	1	0,33	2	0,25	3,32	0,4	0	0,083	1	1	42,183	
20:00	0	0	0	0	8	13	0	0	0,5	0,3	0	0	1	0,33	2	0	3,32	0	0	0	0	1,9	30,35	
21:00	0	0	0	0	8	13	0	0	0,5	0,3	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1,9	26,7	
22:00	0	0	0	0	8	13	0	0	0,5	0,3	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1,9	26,7	
23:00	0	0	0	0	8	13	0	0	0,5	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1,9	26,4	

4.2.3 Courbe de l'énergie pendant une journée

La courbe à la Figure 31 présente l'énergie requise par les charges au cours de la journée. Nous constatons un premier pic autour de 13 heures à 49 kWh et un deuxième pic autour de 20 heures à 42 kWh.

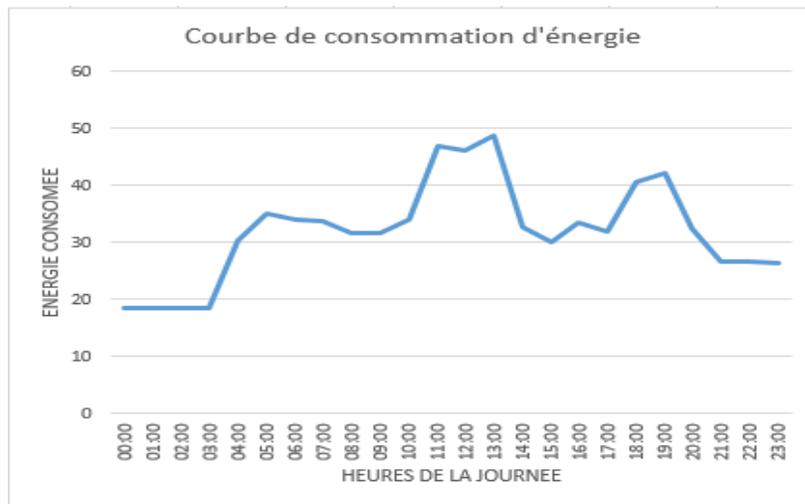


Figure 31 : Courbe de consommation d'énergie

4.3. DIVERS SCÉNARIIS POSSIBLES

Étant donné que nous disposons de deux sources d'énergies renouvelables dépendamment des conditions climatiques, d'une génératrice de 100 kW, d'une seconde génératrice de 30 kW, d'un banc de batteries de 50 kWh, nous allons faire nouvelle simulation dans HOMER avec divers scénarios par heure durant les Mois de Mai, Juin, Juillet et Août qui sont les périodes les plus occupés du camp pendant l'année. Les trois scénarios que nous allons analyser se présentent comme suit :

1. Solaire de 6 kW + Eoliennes de 30 kW + Stockage de 50 kWh
2. Diesel de 100 kW + Eoliennes de 30 kW + Solaire de 6 kW
3. Diesel de 100 kW + Eoliennes de 30 kW + Stockage de 50 kWh + Diesel de 30 kW + solaires de 6 kW.

4.3.1 SOLAIRE DE 6 kW + EOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh

Dans cette configuration avec la simulation dans Homer nous présenterons les résultats du solaire combiné avec 30 kW d'énergie éolienne et 50 kWh de stockage. Nous présenterons dans le Tableau 31 l'apport des différentes sources durant les mois de mai, juin, juillet et août, périodes dans lesquels le camp est plus utilisé et nous ferons une analyse des résultats.

Tableau 31 : Les résultats de la simulation pour le premier scénario

	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Solaire Nord (kWh)	304,09	246,44	233,07	246,01	1029,61
Solaire Sud (kWh)	179,11	193,38	170,11	134,81	677,41
Éolien de 30kW (kWh)	1899,03	1737,16	1268,89	1501,95	6407,03
Charge EnR (kWh)	2355,57	2067,57	1588,47	1788,64	7800,25
Pénétration EnR (%)	7,7801	7,577	7,83	7,83	7,75

4.3.1.1 Analyse des résultats

Au vu des résultats obtenus avec le scénario combinant le solaire, l'éolien et le stockage, nous remarquons une pénétration des énergies renouvelables à 7% en moyenne. Cela confirme que seules les énergies renouvelables ne nous permettront pas d'assurer la demande en énergie du camp d'où besoin y est d'ajouter d'autres sources d'énergies comme une génératrice diesel.

4.3.2 DIESEL DE 100 kW + SOLAIRE DE 6 kW + EOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh

Dans cette nouvelle configuration, le Diesel de 100 kW sera utilisé associé à 6 kW d'énergies solaires, de 30 kW d'énergie éolienne et du stockage de 50 kWh. Les résultats de la simulation sont présentés dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Les résultats de la simulation pour le deuxième scénario

	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Génératrice de 100 kW(kWh)	2181,61	17701,00	18698,23	18535,74	57116,58
Mazout consommé par la 100 kW(l)	24190,33	6549,52	6855,17	6855,17	44501,54
Solaire sud (kWh)	304,09	246,441	233,070	246,01	1029,58
Solaire Nord (kWh)	179,11	193,38	170,11	134,81	677,41
Éoliennes (kWh)	1725,50	1579,61	1157,91	1367,17	5829,97
Charge (kWh)	23721,38	18847,65	19475,91	19475,91	81520,97
Pénétration EnR (%)	4,68	7,934	5,74	6,37	6,181

4.3.2.1 Analyse des résultats

Au vu des différents résultats résumés dans le tableau, nous remarquons une pénétration moyenne des énergies renouvelables à 6% et une forte consommation en mazout qui s'élève à 44501,54 litres pour la génératrice de 100 kW. Notre but étant de réduire au maximum le démarrage de la génératrice de 100 kW, nous allons refaire une simulation en ajoutant une génératrice de 30 kW, ce qui nous conduit au troisième scénario.

4.3.3 DIESEL DE 100 kW + DIESEL DE 30 kW+ SOLAIRE DE 6 kW + ÉOLIENNES DE 30 kW + STOCKAGE DE 50 kWh

Dans cette nouvelle simulation, nous avons réuni toutes les sources possibles pour réduire au maximum la consommation de la génératrice de 100 kW. Les résultats de la simulation sont présentés dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Les résultats de la simulation pour le troisième scénario

	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Génératrice de 100 kW(kWh)	12002,14	2760,13	4231,33	3805	22798,6
Mazout consommé par la 100 kW(l)	4145,17	989,43	1518,54	1368,19	8020,79
Génératrice de 30 kW(kWh)	9589,65	14173,35	13761,27	14010,25	54533,65
Mazout consommé par la 30kW	3319,37	4937,55	4789,76	4878,71	17925,36
Solaire sud (kWh)	304,09	246,441	233,07	246,01	1029,67
Solaire Nord (kWh)	179,11	193,38	170,11	134,81	677,41
Éoliennes (kWh)	1725,50	1579,61	1157,77	1367,17	5830,85
Charge (kWh)	23721,38	18847,65	19475,91	19475,91	26831,14
Pénétration EnR (%)	6,77	7,93	4.74	6.35	6,45

4.3.3.1 Analyse des résultats

Au vu des différents résultats obtenus dans le Tableau nous remarquons une nette diminution de 36 480 litres en carburant de la génératrice de 100 kW par rapport au deuxième scénario. Cette génératrice sera moins sollicitée vu qu'elle est suppléée par la génératrice de 30 kW, ce qui offre une durée de vie assez élevée et assez de temps pour faire une maintenance. Cette configuration sera utilisée plus tard dans la suite du document pour faire l'évaluation des émissions des gaz à effet de serre.

4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation avec le logiciel Homer pendant une année, heure par heure avec différentes combinaisons et diverses sources afin de voir le taux de pénétration des énergies renouvelables en fonction des conditions climatiques et la configuration optimale est celui de la combinaison du Diesel de 100 kW + Éoliens de 30 kW + Stockage de 50 kWh+ Diesel de 30 kW +solaires de 6 kW. Les différents scénarios nous ont permis de voir la production des différentes sources d'énergie en cas de non-disponibilité des autres.

CHAPITRE 5 : OPTIMISATION DE LA CHARGE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

5.1 INTRODUCTION

L'économie d'énergie est un gain obtenu en réduisant la consommation d'énergie ou les pertes sur l'énergie produite. Dans ce chapitre nous allons analyser les charges en général et faire ressortir la charge énergivore et proposer des solutions en vue de réduire considérablement la demande en énergie.

5.2 ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Dans cette partie nous parlerons de l'efficacité énergétique en relatant les problèmes liés et en faisant des recommandations.

5.2.1 Recommandations pour l'efficacité énergétique du site

Bien que l'utilisation de sources d'énergies renouvelables soit une bonne alternative pour diminuer l'usage de la génératrice diesel et la consommation de diesel, cette solution ne suffit pas pour répondre à la problématique de façon optimale. Outre la source de production, la consommation sur le site doit également être repensée. L'étude des sources consommatrices doit permettre de trouver des zones d'amélioration qui permettront de réduire la demande en énergie électrique.

Lorsque l'on regarde les puissances installées sur le site du camp Esker, il est nettement observable qu'il y a de nombreuses améliorations possibles pour diminuer la consommation énergétique. En effet, une étude détaillée des sources consommatrices permet de voir que 100% de ces sources nécessitent de l'électricité et qu'il s'agit bien souvent de systèmes fortement consommateurs.

Considérant l'importance de ces consommations et la nature des systèmes actuellement en place sur le site, nous proposons des améliorations pour les postes suivants :

- L'éclairage ;
- Les équipements de cuisine ;

- Le chauffage ;
- Le chauffe-eau.

5.2.2 L'éclairage

Actuellement sur le site, les ampoules et tubes sont fluorescents. Même s'il ne s'agit pas du plus gros poste de consommation, l'éclairage reste une charge prépondérante dans le sens qu'elle est nécessaire tout au long de l'année (été comme hiver). Le site possède actuellement de simples ampoules et des tubes fluorescents. Compte tenu des avancées technologiques, il est donc pensable de procéder à une amélioration du système d'éclairage. Une étude sur la possibilité d'insérer un éclairage par D.E.L. (partiel et total) devrait être réalisée. L'avantage d'utiliser la technologie D.E.L. serait doublement intéressant dans le cas d'Esker : d'une part, il permettrait de faire des économies d'énergie non négligeable, d'autre part, la longue durée de vie d'un tel éclairage réduirait la maintenance.

De plus, une étude sur une gestion efficace de la lumière pourrait être faite afin de vérifier si celle-ci est utilisée à bon escient et s'il n'y a pas de gaspillages. Une préconisation sur des systèmes de contrôle (variateur, détecteur...) serait alors envisageable.

5.2.3 Les équipements de cuisine

Les Cuisinières électriques et autres équipements électriques sont les deuxièmes plus gros consommateurs d'électricité sur le camp. Sachant que l'installation future prévoit l'agrandissement de ce poste de consommation, il est primordial de chercher des systèmes plus optimaux pour réduire les demandes énergétiques. Ainsi, les cuisinières électriques actuellement utilisées présentent deux options à envisager : utiliser des plaques à vitrocéramiques ou à induction plutôt que des cuisinières à serpentin (présente sur le site) ou envisager une autre source énergétique comme le gaz. Une étude devra déterminer si ces solutions sont réalistes ou non.

5.2.4 Le chauffage

Concernant le chauffage, les appareils présents sur le site sont les Plinthes électriques, un aérotherme diffuseur et les chaufferettes qui sont responsable de la moitié de la consommation sur le site, le chauffage présente un réel défi énergétique. Bien que le chauffage soit indispensable en hiver dans une zone comme Esker, les systèmes mis en place actuellement permettent de penser que des modifications pourraient réduire grandement sa consommation énergétique. En effet, le site actuel utilise des systèmes purement électriques comme des plinthes qui sont très énergivores et qui nécessitent donc un fort apport des génératrices diesel. La meilleure façon de réduire ce poste de consommation serait d'implanter une chaudière n'impliquant pas l'utilisation d'électricité. Compte tenu de la position d'Esker, une étude sur l'utilisation d'une chaudière biomasse ou gaz serait pertinente (voir l'étude dans la partie suivante). La mise en place d'un tel procédé permettrait de répondre à deux problématiques majeures du site : réduire fortement la consommation de diesel et réduire les émissions de GES.

De plus, la construction des nouveaux bâtiments pourrait faire l'objet d'une étude visant à diminuer les besoins en chauffage. Cela permettrait de réduire encore la demande en énergie, quel que soit le type de source utilisée.

5.2.5 Le chauffe-eau

Le site est équipé actuellement avec des chauffe-eau électriques. Tout comme le chauffage, le chauffe-eau est un poste où il est facile de trouver des améliorations. L'utilisation de ce système avec l'électricité produite par les génératrices représente encore une forte consommation qui serait réductible en utilisant un système plus optimal. Pour ce faire, plusieurs procédés pourraient être étudiés comme par exemple le couplage direct du chauffe-eau avec la chaudière (voir l'étude dans la partie suivante). Dans le cas de l'implantation d'une chaudière biomasse ou gaz, cela permettrait ainsi de globaliser tout l'apport en chaud et de réduire encore la part d'électricité consommée.

Si l'on observe la fréquence d'utilisation de ce poste, il serait également envisageable d'étudier la possibilité d'implanter un chauffe-eau solaire. Malgré que la ressource solaire reste limitée dans une telle zone, il faudrait étudier si cela ne suffisait pas aux besoins du camp. De plus nous disposons de quatre chauffe-eaux sur le site qui peuvent être sériés à raison de 6h par jour selon les besoins.

5.2.6 Les réfrigérateurs

Les réfrigérateurs actuellement sur le site démarrent au même moment et fonctionnent arbitrairement donc aucune régulation ce qui fait augmenter la charge. Donc la solution à envisager est de prévoir des minuteries pour qu'ils ne démarrent pas au même moment, mais l'une après l'autre.

5.3 RÉCAPITULATIF DES AMÉLIORATIONS POSSIBLES

Comme démontré dans les sections précédentes, il y a donc de nombreux postes d'améliorations envisageables sur le camp d'Esger afin de réduire la consommation énergétique. C'est pourquoi nous préconisons fortement une étude énergétique complète. Nous rappelons les modifications envisageables dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Récapitulatif des solutions

Postes	Systèmes actuels	Préconisations
Éclairage	Ampoule/Tube fluo	LED/Système de régulation
Cuisine	Cuisinière électrique	Cuisinière plus moderne/Gaz
Chauffage	Plinthe électrique	Chaudière Biomasse/Gaz
Chauffe-eau	Tout électrique	Couplage chaudière/Solaire thermique
Régulation	Aucun	Système de régulation optimal
Bâtiments	Aucun	Recherche des pertes thermiques

5.4 AUTRES ALTERNATIVES DE SOLUTIONS

Comme présenté précédemment, le chauffage et la production d'eau chaude font actuellement partie des plus gros postes de consommation du site. Cela s'explique par la présence de technologies utilisant systématiquement de l'électricité. De plus, une telle consommation engendre d'importants rejets de gaz à effet de serre à cause des génératrices. Sachant que le rendement de ces technologies n'est en plus pas très optimal, l'étude de technologies alternatives est donc nécessaire pour améliorer la consommation énergétique du site.

5.4.1 Le chauffage

Utilisant actuellement des systèmes électriques de type résistif (plinthés), la technologie de chauffage est très énergivore en plus de ne pas être optimale. Compte tenu des autres procédés existants, la meilleure solution à envisager est l'utilisation d'une autre source d'énergie. Nous proposons ainsi de choisir entre le gaz ou le bois.

5.4.1.1 Chaudière gaz à condensation

Le choix du gaz comme combustible possède plusieurs avantages. Tout d'abord d'un point de vue économique puisque celui-ci coûte moins cher que l'électricité pour 1 kWh de chaleur produit (cela est d'autant plus vrai dans le cas où l'électricité est produite à partir d'une génératrice diesel). De plus, la combustion est très efficace, moins polluante que le diesel, et la régulation de celle-ci est assez facile, ce qui permet de chauffer exactement au moment souhaité. Pour ces raisons, l'utilisation du gaz pour le chauffage est donc une alternative envisageable.

Dans le cas où le gaz est choisi comme source d'énergie, nous proposons d'utiliser une chaudière à condensation qui est actuellement une des technologies les plus efficaces. Le fonctionnement d'une telle chaudière reste assez simple puisqu'il est semblable à une chaudière traditionnelle, mais à laquelle on rajoute une récupération de chaleur supplémentaire à partir des fumées. En effet, lors de la combustion, les fumées qui en proviennent sont alors condensées pour pouvoir en tirer une source de chaleur

supplémentaire. Grâce à un tel procédé, le rendement de la chaudière est donc augmenté sans avoir à utiliser une quantité de combustible supplémentaire.

Cette technologie (Figure 32) semble tout à fait envisageable sur le camp puisque son utilisation et sa livraison ne seront pas plus contraignantes que celles d'une génératrice. De plus, l'utilisation du gaz même pourrait également être faite au niveau des cuisines avec des poêles à gaz par exemple.



Figure 32 : Schéma de principe d'une chaudière à condensation (Guide-Prix, 2016)

5.5.1.2 Chaudière à bois

Tout comme son prédécesseur, ce combustible présente divers avantages. Premièrement, compte tenu de la ressource forestière au Québec, le bois est une source abondante et moins chère que l'électricité issue d'une génératrice diesel. Deuxièmement, le chauffage par bois est sans aucun doute la source la moins émettrice de GES. Dans le cadre

d'une réduction conséquente des émissions de GES sur le camp, l'utilisation d'une chaudière bois est donc fortement conseillée.

Si le bois est utilisé comme source énergétique, il existe alors deux grands types de chaudières qui dépendent du conditionnement du bois. Ainsi, le premier type de procédé utilisé est une chaudière à bûches. Comme son nom l'indique, elle utilise des bûches de bois qui sont directement enfournées dans la chambre de combustion. Le prix de ce bois est le moins onéreux, car il nécessite que très peu de travail de conditionnement. Cependant, il n'y a aucun système d'approvisionnement automatisé pour ce type de chaudière. C'est pourquoi le deuxième type de procédé pourra paraître plus intéressant. Il s'agit de la chaudière à pellets qui utilise de petites fractions de bois compactées en granulés. Même si le prix de pellets est plus élevé que celui des bûches, l'utilisation d'une telle chaudière permet d'avoir un système d'approvisionnement automatisé ainsi que d'avoir un réservoir de stockage bien plus faible pour la même quantité de bois. Bien que le rendement de cette technologie soit un peu plus faible qu'une chaudière à gaz à condensation, sa performance d'un point de vue environnemental est sans aucun doute la meilleure de tous les procédés de chauffage. C'est pourquoi nous conseillons de réaliser également une étude de dimensionnement pour cette technologie comme l'indique la Figure 33.

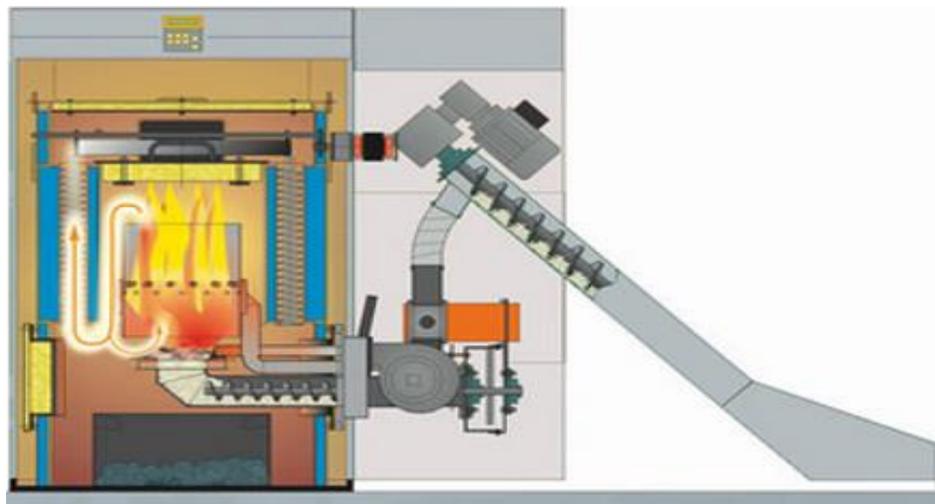


Figure 33 : Schéma de principe d'une chaudière à pellets

5.4.2 Le chauffe-eau

La réflexion au sujet de la production d'eau chaude est exactement la même que celle pour le chauffage puisque l'équipement existant nécessite une forte consommation électrique et par conséquent de forts rejets de gaz à effets de serre. Nous préconisons ainsi les alternatives suivantes : un système combiné chauffage/chauffe-eau ou l'utilisation de capteurs solaires.

5.4.2.1 Le chauffe-eau combiné

D'apparence complexe, ce genre de procédé est pourtant une solution pratique qui pourrait correspondre au camp Esker. En effet, les avantages de cette technologie sont multiples : la principale étant l'économie réalisée puisque l'on utilise une partie du système de chauffage, ce qui réduit le matériel nécessaire uniquement pour chauffer l'eau. En utilisant un des systèmes de chauffage présentés précédemment, une réduction des GES (par rapport au système actuel) est donc forcément assurée.

Il existe différents types de façon de réaliser la combinaison entre le chauffage et le chauffe-eau, mais, pour la majorité des cas, le principe reste le même. Celui-ci étant d'incorporer le circuit d'eau sanitaire dans la chaudière en plus du circuit d'eau pour le chauffage. Les deux circuits bénéficient donc de la même chaleur produite par la combustion. Compte tenu de la demande discontinue de l'eau chaude, ce système est pratique, car il bénéficie directement de la chaleur déjà produite sans nécessiter l'enclenchement d'un système supplémentaire de production de chaleur.

Sans un dimensionnement précis de l'installation de chauffage et de la détermination des besoins, il est difficile d'estimer le rendement d'une telle installation. Cependant, l'expérience pour ce type de procédé permet de confirmer que c'est une bonne alternative d'autant plus qu'elle s'appliquerait parfaitement aux systèmes de chauffage préconisés.

5.4.2.2 Chauffe-eau solaire

Cette technologie est sans doute la meilleure en termes de coûts du « combustible » et d'émissions de gaz à effet de serre puisqu'ils sont tous simplement nuls. L'utilisation directe de l'énergie solaire n'engendre en effet aucuns frais et chauffer de l'eau avec le soleil n'émet évidemment aucun polluant. Pour ces deux raisons, ce procédé est donc actuellement le meilleur pour ce qui est de la production d'eau chaude sanitaire.

Hormis le type de capteur (plan ou tubulaire), le principe de cette technologie est le même, peu importe l'installation. En effet, un liquide (mélange d'eau + additif) parcourt un circuit qui subit un réchauffement au niveau de son passage dans les capteurs puis qui restitue ses calories au niveau de la réserve d'eau. Dans les cas où la ressource solaire risque d'être insuffisante ou trop discontinuée par rapport aux besoins, une résistance électrique d'appoint est souvent placée par sécurité dans le ballon.

Cette solution (Figure 34) se présente donc idéale par rapport aux exigences souhaitées en termes de baisse de la consommation électrique et des émissions de GES. Néanmoins, les conditions météorologiques associées au site d'Esker peuvent présenter certains doutes au niveau de la viabilité d'un tel procédé. Une analyse de faisabilité et un dimensionnement d'un chauffe-eau solaire seront donc pertinents.

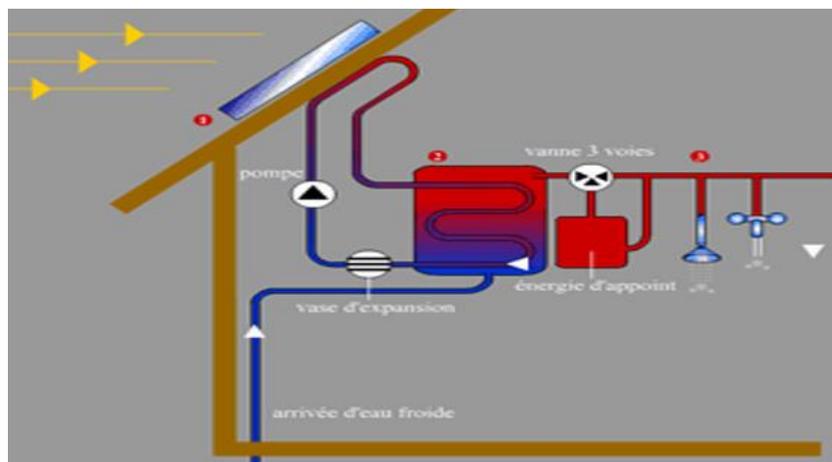


Figure 34 : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire (Ecohabitation,2017)

5.4.3 l'Augmentation de la capacité de production des énergies renouvelables

Vu que le site regorge d'un potentiel en énergies renouvelables, une autre option est de les augmenter en afin que certaines charges précises moins énergivores soient alimentées.

5.5 RÉCAPITULATIF

Pour l'instant nous ne sommes pas en mesure de présenter un dimensionnement de ces installations, mais cela devra faire l'objet d'une étude plus complète. Pour ce faire, il sera nécessaire de regrouper des informations primordiales comme le type de bâtiment, la surface des pièces, le nombre de pièces, le nombre d'occupants et toutes autres données permettant de déduire les besoins exacts en chauffage et eau chaude. Le Tableau 35 récapitule les systèmes de chauffage et de chauffe-eau recommandés.

Tableau 35 : Systèmes de chauffage et de chauffe-eau recommandés

Postes	Systèmes actuels	Préconisations
Chauffage	Plinthe électrique	Chaudière gaz à condensation
		Chaudière à bois
Chauffe-eau	Tout électrique	Système combiné
		Chauffe-eau solaire

5.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre les équipements énergivores ont été identifiés. Diverses solutions ont été proposées en vue de faire une le plus d'économie d'énergie possible. Dans les solutions proposées menant vers une économie d'énergie, nous avons proposé que les lampes qui étaient fluorescentes soient remplacées par les LED, la cuisinière qui est tout électrique soit remplacée par une cuisinière à gaz, les plinthes électriques soient remplacées par une chaudière à gaz ou biomasse et les équipements comme les chauffe-eaux qui sont électriques soient remplacés par des chauffe-eau solaires.

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

6.1 DEFINITION

Les gaz à effet de serre sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent ainsi à l'effet de serre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs à l'origine du réchauffement climatique (Actu Environnement 2018).

6.1.1 Les principaux gaz à effet de serre

Dans la littérature les principaux gaz à effet de serre sont entre autres (Actu Environ 2018):

- Le dioxyde de carbone (CO₂) ;
- Le méthane (CH₄) ;
- Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O).

6.1.2 Les effets nocifs des gaz à effet de serre

Dans la littérature, les effets nocifs des gaz à effet de serre (Mtaterre, 2017) sont :

- Le réchauffement planétaire ;
- L'acidification des océans ;
- La destruction de la couche d'ozone.

6.1.4 Les solutions pour réduire l'effet des gaz à effet de serre

En général, les solutions (Mission Énergie, 2019), sont :

- Encourager la marche, le vélo et les transports en commun ;
- Améliorer l'isolation des bâtiments ;
- Modifier son alimentation.

Étant donné que dans cette étude nous avons d'abord réduit la puissance de la génératrice 100 kW et ajouté d'autres sources d'énergies propres pour réduire les gaz à effet de serre, nous ferons une simulation avec le logiciel pour faire une comparaison entre l'ancien système et le nouveau en termes de réduction des gaz effet de serre. Dans le Tableau 36 se retrouve cette synthèse.

Tableau 36 : Résumé des émissions de gaz à effet de serre

		Cas de référence actuel	Situation après la réalisation du projet
Description	Unité	Génératrice 150 kW (référence)	GEN 100+2GCM+3GC-6 (6kW solaire, 30kW éolien, 50 kWh stockage batteries, une génératrice diesel de 30 kW , génératrice 100 kW)
Stockage (durée de vie)	années	-	7
Autonomie énergétique (Batteries)	Heures	-	3,79
Consommation annuelle de carburant	L/an	115 402	36 268
Émissions annuelles ¹	kg/an	Carbon Dioxide : 302,815 kg/yr Carbon Monoxide : 1,436 kg/yr Unburned Hydrocarbons : 83.1 kg/yr Particulate Matter : 6.46 kg/yr Sulfur Dioxide : 740 kg/yr Nitrogen Oxides : 1,641 kg/yr	Carbon Dioxide : 94,852 kg/yr Carbon Monoxide : 651 kg/yr Unburned Hydrocarbons : 26.1 kg/yr Particulate Matter : 33.2 kg/yr Sulfur Dioxide : 232 kg/yr Nitrogen Oxides : 740 kg/yr
Émissions annuelles de GES (eCO ₂) selon le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) de chaque GES. Le CO ₂ étant le seul GES émis dans ce cas, on le calcule en le multipliant *son PRP. Le PRP du CO ₂ étant égal à 1 on trouve:	kg/an	302 815	94 852

Le Tableau 37 présente l'estimation des réductions d'émissions de GES au Québec attribuables au projet, exprimées en tonnes d'équivalent CO2 (tCO2e), aux dates suivantes :

- Réductions annuelle et cumulée à l'horizon 2021,
- Réductions annuelle et cumulée à l'horizon 2022,
- Réductions annuelle et cumulée à l'horizon 2030,
- Réductions annuelle et cumulée à l'horizon 2050.

Tableau 37 : Évaluation de GES jusqu'en 2050

	Unités	Cas de référence actuel	Situation après la réalisation du projet
Émissions annuelles de GES (eCO2)	kg/an	302 815	94 852
Pourcentage de réduction d'émissions de GES	%	-	68,68%
Réduction d'émissions de GES résultant du projet	kg/an	-	207 963
Réductions cumulées à l'horizon 2022	kg	-	415 926
Réductions cumulées à l'horizon 2030	kg	-	1 871 667
Réductions cumulées à l'horizon 2050	kg	-	6 030 927

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les camps situés dans les milieux reculés représentent des points de chute pour diverses compagnies opérantes dans les régions difficiles d'accès. Dans ces régions dites isolées, l'électricité traditionnelle étant inaccessible, les énergies renouvelables sont des solutions les plus prometteuses, surtout lorsqu'elles sont associées ensemble. C'est dans cette perspective que nous avons fait cette étude pour l'alimentation d'un camp par un système hybride d'énergie tout en faisant une étude énergétique en zone isolée. Nous avons commencé par une revue littéraire, qui nous a permis de comprendre la situation des sites isolés au Canada, les sources d'énergie y existantes, les problèmes liés à leur électrification, question de nous situer l'intérêt de cette étude. Nous avons pu constater que la majorité des sites isolés où l'électricité traditionnelle n'est pas disponible sont alimentés généralement par des groupes électrogènes.

Afin de proposer une simulation optimale du système hybride de production d'énergie, nous avons fait une étude sur les caractéristiques techniques du site, l'évaluation du potentiel éolien et solaire sur le site en question. Connaissant les besoins en énergie électrique du site, connaissant aussi les données météo, vient l'étude de la faisabilité avec le logiciel Homer, qui consiste à trouver le bon compromis entre la production électrique et la charge, une simulation des coûts de maintenance de chaque équipement a été faite, mais aussi la consommation en mazout des génératrices choisi afin de savoir à quoi s'attendre du côté financier.

Trois scénarios ont été proposés en fonction des conditions climatiques et en fonction des résultats, nous avons retenu la configuration combinant la génératrice de 100 kW, les éoliennes de 30 kW, une autre génératrice de 30 kW, les panneaux solaires de 6 kW et un stockage de 50 kW. Avec cette configuration nous constatons une diminution du fuel de la grande génératrice moyennant les 36480 litres sur les quatre mois.

En outre une étude énergétique a été effectuée pour identifier les équipements énergivores et des solutions ont été proposées pour réduire au maximum la charge afin de réduire la consommation en mazout des génératrices choisi et réduire au passage l'émission des gaz à effet de serre à 94 852 kg/an au lieu de 302 815 kg/an.

Suggestions de travaux

- Faire le choix des technologies à utiliser pour réduire la charge et refaire un bilan énergétique afin de faire une simulation pour analyser le pic de charge entre l'ancien et le nouveau système ;
- Faire une simulation sur deux ou trois ans afin d'avoir une base de données plus importante pour mieux analyser les charges ;
- Utiliser une technique d'intelligence artificielle pour prédire la charge afin de mieux déterminer les stratégies d'optimisation ;
- Concevoir un système d'acquisition de données afin d'enregistrer et d'analyser les paramètres importants du système comme la tension, le courant et la fréquence.

Références bibliographiques

- Actu Environnement, (2018) Dictionnaire de l'environnement.
<https://www.actu-environnement.com/>
- Akinyele, D.B., J. Levron, Y (2017)., Battery Storage Technologies for Electrical Applications: Impact in Stand-Alone Photovoltaic Systems. Energies.
- Bruno E (2010), Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- BOGRE, G.R. (2012), Installation et mise en service d'un groupe électrogène de 550kva a l'ONATEL ZAD. Ecole Supérieure Polytechnique de Kaya - DUT 2012.
- CDE (Mars 2020) Le point sur le développement du parc éolien mondial.
<https://www.connaissancedesenergies.org/>
- David, C.(2016) Le train du grand nord on Vimeo. Court métrage documentaire sur le train autochtone qui relie Sept-Iles à Schefferville au Québec. <https://vimeo.com/136882961>
- Dunn, B., H. Kamath, and J.-M. Tarascon, (2011) Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. Vol. 334. 2011. 928-35
- Eco habitation, (2017), le chauffe-eau solaire pour chauffer l'eau et la maison <https://www.ecohabitation.com/guides/2371/>
- Gouvernement du Canada, (2016), Atlas éolien <http://www.atlaseolien.ca/>
- Gouvernement du Canada. (2016) Recensement de 2016 de statistique Canada.
<https://www12.statcan.gc.ca>
- Gouvernement du Canada (Août 2011), Statut of remote off-grid communities in Canada.
<https://www.nrcan.gc.ca/energy/publications/sciences-technology>
- Guide-Prix, (2016), Guide des prix d'une chaudière à gaz à condensation. <https://guide-prix.com/>
- Feltane S et Bouklab S, (2021), Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, Master en Électromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel.
- Hunter R., E.G (1994) Wind-Diesel Systems: A Guide to the Technology and its Implementation. Cambridge University Press, 1994: p. 264.

- Ibrahim, H. (2010), Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé. Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle au Doctorat en ingénierie.
- Ibrahim, H., et al. (2010), Study and design of a hybrid wind–diesel-compressed air energy storage system for remote areas. *Applied Energy*: p. 1749-1762.
- Ibrahim, H., et al. (2013) Modeling and simulation of a novel small-scale compressed air hybrid system for stand-alone off-grid applications. in 2013 IEEE Electrical Power & Energy Conference.
- Ilinca, A. (2017) Cours énergies renouvelables. Département d'informatique et de Génie, UQAR
- Ismail, M., et al. (2014) Optimal configuration of Hybrid Renewable Energy System for remote areas of Balochistan. in 17th IEEE International Multi Topic Conference.
- KAOUTAR, B. (2017), Développement d'une approche décisionnelle multicritère pour le choix d'un système énergétique renouvelable à implanter dans les sites isolés, mémoire de maîtrise, UQAR.
- Landry, M. and Y. Gagnon, (2015); Energy Storage: Technology Applications and Policy Options. *Energy Procedia*. p. 315-320.
- Leng et Coll. (2000) Eléments d'un système hybride (Solaire-Eolien-Diesel), *Revue de physique Appliqué*.
- Lila C, (2014), Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs. Thèse de Doctorat, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'INGENIEURS DE POITIERS.
- Lipman, N.H. (1994), Overview of Wind/Diesel Systems. Rutherford Appleton Laboratory.
- Ludmil, S. (2011) Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Thèse préparée en cotutelle et soutenue pour l'obtention du grade de Docteur en Energetique à l'Université de Corse Pasquale Poli.
- Maxim, T. (2015), L'impact de l'électrification rurale : enjeux et perspectives, *Revue d'économie du développement*. (Vol. 23), pages 55 à 83.
- Mission Energie, (2019), Comment réduire les émissions mondiales des gaz à effet de serre
<https://www.missionenergie.goodplanet.org>

Mohamed S, (2016), Modélisation Analytique et Simulation Numérique de L'évaluation de l'Efficacité Energétique des Bâtiments, Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ MOHAMMED V.

Moussavi-Harami, S.F., et al (2013), Characterization of molecules binding to the 70K N terminal region of fibronectin by IFAST purification coupled with mass spectrometry. J Proteome Res: p. 3393-404.

Mtaterre, (2017), les gaz à effets de serre, <https://www.mtaterre.fr/>

Nicolas, M. (2015) Étude énergétique et modélisation d'un Système Hybride Eolien-Diesel avec stockage d'Air Comprimé (SHEDAC). Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en Ingénierie (p 1).

Québec, H. (2017), <http://www.hydroquebec.com/data/affaires/pdf/aff-reseaux-autonomes-fevrier2017-fr.pdf>

Richard, L. (2018) Utilisation des Energies renouvelables pour l'alimentation pour l'alimentation électrique d'une station de télécommunication en site isolé, mémoire de maîtrise, UQAR.

René G, (2012), SYSTEMES HYBRIDES EOLIEN-DIESEL EN CLIMAT FROID: LE CAS DE LA BASE ANTARCTIQUE JUBANY, Mémoire de Maîtrise, UQAR.

Sahraoui H,(2020) Etude et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire de Master, Université Mohamed khider biskra.

Statistiques Canada (2007), Production, Transport et Distribution de l'électricité. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/f>

Yannick, O. (2015), Analyse et Optimisation d'un Système de production d'énergies pour l'électrification rurale : cas du village « manaboe » dans la commune de Bohicon au Benin. Master en Génie Electrique, Energétique et Energies Renouvelables, 2IE.

